
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika

Návrh průmyslového regulátoru tlaku

The Pressure Control Valve Development

Diplomová práce

Autor: Bc. Plachý Ondřej

Vedoucí práce: Ing. Hubka Lukáš, Ph.D

V Liberci 1. 1. 2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Plachý**
Osobní číslo: **M09000253**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a inženýrská informatika**
Název tématu: **Návrh průmyslového regulátoru tlaku**
Zadávající katedra: **Ústav řízení systémů a spolehlivosti**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Prostudujte problematiku tlakových regulátorů a popište současný stav vývoje.
2. Vytvořte vlastní inovativní návrhy konstrukčního řešení regulátoru tlaku a zvolte nejvhodnější konstrukci.
3. Popište technologický postup výroby prototypu a nutné úpravy pro sériovou výrobu.
4. Provedte měření na vyrobeném regulátoru a vyhodnoťte výsledky.
5. Porovnejte navržený regulátor s používanými průmyslovými regulátory tlaku.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Jenčík ,J, Volf, J, et al. Technická měření. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000.
2. Zehnula, K. Snímače neelektrických veličin. 2. vyd. Praha: SNTL, 1983. 371 s.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.
Ústav řízení systémů a spolehlivosti

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2011
Termín odevzdání diplomové práce: 18. května 2012


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Libor Tůma, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 14. října 2011



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

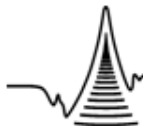
Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 1.1.2012

Podpis: Plachý Ondřej



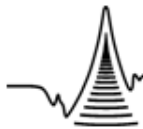
Abstrakt

Cílem této diplomové práce je nejprve prostudovat současné průmyslové regulátory tlaku vzduchu, a poté navrhnout a prakticky realizovat vlastní variantu průmyslového regulátoru tlaku vzduchu.

Úkolem navrženého regulátoru je udržovat stálý tlak i při změně vstupního tlaku, umožňovat rychlé přednastavení požadovaného výstupního tlaku a zajišťovat velký objemový průtok vzduchu bez výrazného poklesu výstupního tlaku. Zároveň se dosahují obdobné či lepší regulační, výrobní a provozní vlastnosti, než které mají dnes běžně používané průmyslové regulátory tlaku vzduchu.

Klíčová slova

průmyslový regulátor, tlak vzduchu, regulační vlastnosti, regulace, konstrukce



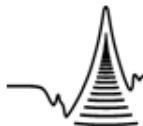
Abstract

The aim of this Diploma Thesis is to study the current industrial air pressure regulators, and then to propose and practically carry out the own variation of the industrial air pressure regulator.

The main task of the regulators is to maintain a constant pressure even with the change of the entrance pressure, further to enable quick preset of the required output pressure and to detect high volume rate of air flow without strong fall in output pressure. At the same time the similar or better adjusting, manufacturing and operating properties common in the currently used industrial air pressure regulators have to be achieved.

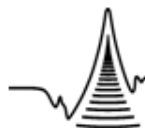
Key words

industrial regulator, air pressure, adjusting property, regulation, construction



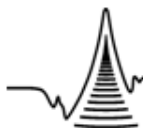
Poděkování

Na této stránce bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Lukáši Hubkovi, Ph.D, který byl vždy ochoten pomoci a zodpověděl mi otázky týkající se mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu a pomoc, které se mi od nich dostávalo po celou dobu mého studia.

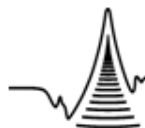


Obsah

Seznam symbolů	10
Seznam vzorců.....	12
Seznam obrázků	13
Seznam tabulek.....	14
Seznam grafů	15
Úvod	16
1 Problematika tlakových regulátorů	17
1.1 Základní typy průmyslových regulátorů.....	17
1.1.1 Mechanické regulátory.....	18
1.1.2 Elektronické regulátory.....	19
1.2 Základní parametry regulátorů tlaku	20
1.2.1 Vstupní tlak	21
1.2.2 Výstupní tlak	21
1.2.3 Opakovatelná přesnost výstupního tlaku.....	22
1.2.4 Objemový průtok.....	22
1.2.5 Tlaková difference při daném průtoku	23
2 Vlastní konstrukční řešení a volba nejvhodnější konstrukce	24
2.1 Vytvoření možných variant konstrukce	26
2.1.1 Nutné podmínky konstrukce.....	29
2.1.2 Výrobní parametry konstrukce	29
2.2 Konkrétní typy konstrukčního řešení.....	30
2.2.1 První varianta - Podélný regulátor tlaku	31
2.2.2 Druhá varianta - Kolmý regulátor tlaku	36
2.3 Volba nejvhodnější konstrukce z možných variant.....	39
2.3.1 Volba konstrukce dle parametru regulace	39
2.3.2 Volba konstrukce dle výrobních a provozních vlastností	41
3 Způsob výroby prototypu a možnosti sériové výroby	44
3.1 Postup při výrobě prototypu.....	44
3.2 Možnosti sériové výroby a s tím související nutné úpravy	47

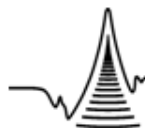


4 Měření na vyrobených regulátorech.....	49
4.1 Způsob měření jednotlivých parametrů regulátoru	49
4.1.1 Měření výstupního tlaku	49
4.1.2 Měření opakovatelné přesnosti výstupního tlaku.....	50
4.1.3 Měření objemového průtoku	51
4.1.4 Měření tlakové difference při daném průtoku	52
4.2 Použité nástroje při měření.....	52
4.3 Předpokládané výsledky měření na základě výpočtů.....	53
4.4 Výsledky měření navržených regulátorů.....	56
4.5 Výsledky měření průmyslového regulátoru	60
5 Vyhodnocení výsledků měření a porovnání navržených regulátorů s průmyslovým regulátorem	64
5.1 Vyhodnocení výsledků měření.....	64
5.2 Porovnání navržených regulátorů s průmyslovým regulátorem.....	66
5.2.1 Porovnání dle parametrů regulace	66
5.2.2 Porovnání dle výrobních a provozních vlastností	68
Závěr	70
Použitá literatura.....	71
Přílohy diplomové práce	72

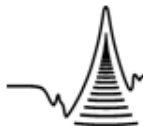


Seznam symbolů

d [mm]	vnitřní průměr pístu
D [mm]	vnější průměr pístu
D_n [mm]	vnitřní průměr nádoby
dT	změna času
dV	změna objemu
F_d [N]	deformační síla
F_p [N]	tlaková síla
$F_{P_{\max}}$ [N]	maximální síla vyvinutá pružinou
l [mm]	dráha pístu
l_{def} [mm]	velikost deformace
l_k [mm]	dráha kompenzace
P [bar]	tlak
P_{\max} [bar]	maximální výstupní tlak
P_{\min} [bar]	minimální výstupní tlak
P_{ref} [bar]	referenční výstupní tlak
P_z [bar]	pokles tlaku
Q_v [l/min]	objemový průtok
R	rozsah stupnice
R_e [N/mm ²]	mez kluzu
s	bezpečnostní konstanta
S_{\max} [mm]	maximální stlačení pružiny
S_p [mm ²]	plocha pístu
t [s]	čas
T [s]	perioda



T_p	třída přesnosti
t_s [mm]	tloušťka stěny
u_B	nejistota měření
ΔP [%]	maximální změna výstupního tlaku



Seznam vzorců

$$1 \quad \Delta P = \frac{P_{ref}}{P_{min}} - \frac{P_{ref}}{P_{max}} \cdot 100$$

$$2 \quad Q_v = \frac{dV}{dT}$$

$$3 \quad t_s = \frac{D_n \cdot P \cdot S}{2 \cdot R_e}$$

$$4 \quad P_1 \frac{V_1}{t_1} = P_2 \frac{V_2}{t_2}$$

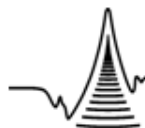
$$5 \quad P_{max} = \frac{FP_{max}}{S_p}$$

$$6 \quad S_p = \frac{D^2 - d^2}{4} \pi$$

$$7 \quad S_p = \frac{\pi D^2}{4}$$

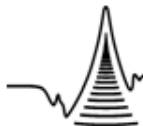
$$8 \quad P_z = l / \frac{S_{max}}{P_{max}}$$

$$9 \quad u_B = \frac{T_P R}{3} 10^{-2}$$



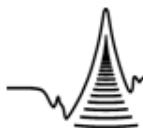
Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Regulační tlakový ventil [2].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2 PID regulátor tlaku Sentronic [5]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3 Schéma postupu řešení konstrukčního úkolu [3].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4 Vysokotlaký regulátor firmy Swagelog [6].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 5 Návrhový výkres [4].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 6 Reálná podoba předlohy využitá pro navrhovaný regulátor [4]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 7 Návrhový výkres v osovém 3D řezu</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 8 Diagram působících sil a příslušných posunutí.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 9 Kompenzace deformace manžety, 3D řez.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 10 Funkce ochranného od vzdušňovacího kanálku.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 11 Návrhový výkres druhé varianty v osovém 3D řezu.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 12 Detailní zobrazení kanálků dutého pístu, osový 3D řez</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 13 Těla regulátorů obou variant</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 14 Výrobní výkres</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 15 Stolní soustruh CQ9318 a stolní frézka na kov FM-16</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 16 Prototyp první varianty regulátoru tlaku</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 17 Prototyp druhé varianty regulátoru tlaku.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 18 Jednopístový kompresor CB 24</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 19 Regulátor tlaku MS4-LRB-1/4-D5-A8-A5.....</i>	<i>61</i>



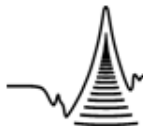
Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 - Výstupní tlak - opakovatelná přesnost</i>	57
<i>Tabulka 2 - Maximální objemový průtok</i>	58
<i>Tabulka 3 - Maximální objemový průtok</i>	58
<i>Tabulka 4 - Pokles výstupního tlaku při daném průtoku</i>	59
<i>Tabulka 5 - Maximální objemový průtok (průmyslový regulátor)</i>	61
<i>Tabulka 6 - Maximální objemový průtok (první varianta regulátoru)</i>	61
<i>Tabulka 7 - Výstupní tlak - opakovatelná přesnost</i>	62
<i>Tabulka 8 - Pokles výstupního tlaku při daném průtoku</i>	62
<i>Tabulka 9 - Výstupní tlak - opakovatelná přesnost</i>	66
<i>Tabulka 10 - Tlaková difference při změně vstupního tlaku</i>	67



Seznam grafů

<i>Graf 1 – První varianta regulátoru</i>	<i>59</i>
<i>Graf 2 – Druhá varianta regulátoru.....</i>	<i>60</i>
<i>Graf 3 – Průmyslový regulátor</i>	<i>62</i>
<i>Graf 4 – Srovnání regulátorů.....</i>	<i>67</i>



Úvod

Regulace je proces, který má za úkol udržovat určitou fyzikální veličinu na požadované hodnotě, případně v požadovaných mezích. Jejím hlavním úkolem je, ale především zajistit odolnost systému vůči poruchám. Řízení a regulace se v dnešní době stalo nepostradatelnou součástí průmyslu. Nejčastějšími typy používaných tlakových regulátorů jsou mechanické regulátory a elektronické regulátory.

Úkolem této diplomové práce je zpracování problematiky průmyslových regulátorů tlaku vzduchu, navržení a zhotovení vlastních variant mechanických regulátorů výstupního tlaku vzduchu. Výroba regulátorů bude zajištěna vlastním strojním vybavením a vlastní manuální činností. Navržené regulátory by měly sloužit k regulaci tlaku vzduchu v rozvodných sítích a jako vstupní člen u pneumatických zařízení a strojů.

Druhá část práce se zaměřuje na změření jednotlivých parametrů navržených regulátorů a jejich celkového porovnání s běžně používaným průmyslovým regulátorem tlaku vzduchu.

1 Problematika tlakových regulátorů

V současné době se tlakový vzduch využívá čím dál častěji v průmyslu i běžném životě. Z těchto důvodů je nutné věnovat se problematice redukce tlaku vzduchu a jeho regulace, abychom mohli lépe využít jeho potenciál. K těmto účelům slouží regulátory tlaku, kterých je velké množství druhů, a které se vzájemně liší jak svojí konstrukcí, tak způsobem regulace.

1.1 Základní typy průmyslových regulátorů

Průmyslové regulátory lze rozdělit především dle základního dělení na mechanické regulátory a elektronické regulátory. U mechanických regulátorů se nejčastěji využívá předpětí pružného elementu (vinutých pružin, talířových pružin) pro nastavení požadovaného výstupního tlaku a systému rovnovážného stavu mezi tlakovou silou regulovaného vzduchu a silou vyvinutou pružným elementem. U elektronických regulátorů se požadovaná hodnota či požadovaný rozsah tlaku zadává v podobě číselného údaje uloženého v paměti regulátoru, který se porovnává s údaji z tlakového snímače. Na základně velikosti odchylky a nastavení regulačního pochodu se ovládá rychlost a velikost otevření sedla ventilu, čímž se řídí průtok neregulovaného vzduchu do části regulátoru s regulovaným vzduchem.

Samotný proces regulace bez ohledu na samotnou konstrukci regulátoru lze také rozdělit dle počtu poloh nastavovací veličiny.

- **Spínací (přepínací) regulátory**

Mění nastavovací veličinu přepínáním dvou až několika hodnot.

- **Analogové spojitě regulátory**

Přestavují plynule nastavovací veličinu.

- **Číslicové (digitální) regulátory**

Mění nastavovanou veličinu stupňovitě. Při mnohastupňové regulaci, s malými kroky mezi jednotlivými hodnotami lze

dosáhnout jemné a plynulé regulace, která je téměř stejná jako u analogových regulací.

Pro účely této diplomové práce se spínací regulace příliš nehodí z důvodů nemožnosti nastavování plynulého rozsahu, a proto v dalším textu již nebude uvedena.

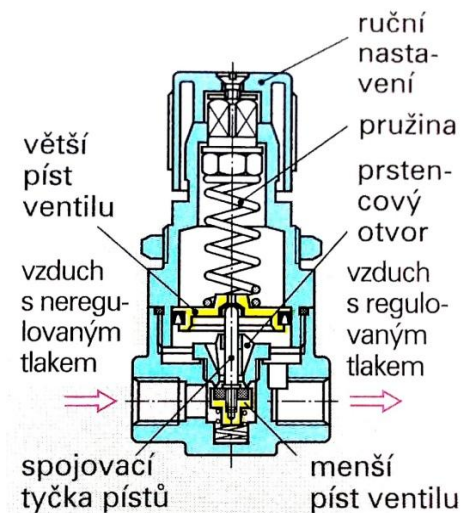
Důvodem, proč se dnes stále ještě používají mechanické regulátory tlaku, je především cena, která je výrazně nižší oproti elektronickým regulátorům, a také absence nutnosti zajistit přívod elektrické energie, případně absence problémů spjatých s jejím výpadkem. [2]

1.1.1 Mechanické regulátory

Mechanické regulátory, které jsou v tomto případě zároveň i analogové regulátory, mohou nastavit výstupní veličinu na kteroukoliv hodnotu mezi dvěma krajními hodnotami spojitého rozsahu. Někdy jsou též označovány jako spojité regulátory.

Příkladem typického analogově mechanického tlakového regulátoru je regulační tlakový ventil (obr. 1), který se běžně používá v průmyslových jednotkách na regulaci stlačeného vzduchu, kde má za úkol udržovat konstantní výstupní tlak na předem pevně nastavené hodnotě.

Způsob regulace probíhá pomocí dvoupístového ventilu. Na větší píst působí regulovaný (provozní) tlak vzduchu a proti němu působí opačnou silou stavitelná pružina z druhé strany pístu. Poklesne-li provozní tlak pod žádanou hodnotu, překoná síla pružiny tlakovou sílu od regulovaného vzduchu, čímž se posune menší píst dolů a otevře větší plochu pro průtok neregulovaného vzduchu. Při dosažení provozního tlaku nastavené hodnoty se přepouštěcí otvor zcela uzavře do té doby, dokud tlak nepoklesne pod žádanou hodnotu. Tento základní princip je vesměs shodný pro většinu mechanickým regulátorů tlaku.



Obr. 1 Regulační tlakový ventil [2]

1.1.2 Elektronické regulátory

Elektronické regulátory se skládají ze dvou bloků, které mohou být zakomponovány do jednoho zařízení, nebo mohou být vzájemně odděleny. Jedním blokem je samotná řídicí jednotka a druhým blokem akční člen, který fyzicky ovlivňuje regulovaný tlak.

Pro elektronický regulátor je nejdůležitějším prvkem mikroprocesor, který řídí samotný regulační proces. Ten zde především počítá regulační diferenci a v souladu s naprogramovanými vlastnostmi regulátoru vypočítává hodnoty nastavovací veličiny. Následně odpovídající signály předává akčním členům v regulační soustavě. Akčními členy u tlakových elektronických regulátorů jsou především servoventily, popřípadě solenoidové ventily. Servoventily mohou být klasické ventily, které jsou navíc vybaveny elektromotorem se zpětnou vazbou či krokovým motorem. Solenoidový ventil tvoří klasický ventil s kuželkou a sedlem ventilu, jež je spojena s pohyblivou částí elektromagnetu.

Výhoda servoventilů oproti solenoidovým ventilům tkví v tom, že u servoventilu lze jednoduše nastavovat velikost otevření ventilu a tím plynule regulovat průtok tímto ventilem. U solenoidových ventilů ve většině případů lze použít pouze dva stavy, kdy je ventil buď plně otevřen, nebo úplně

zavřen, což značně omezuje možnosti regulace. Naproti této nevýhodě jsou však solenoidové ventily výrazně levnější než servoventily.

Pro příklad číslicového regulátoru tlaku je zde prezentován proporcionální ventil s PID regulátorem firmy Asco/Joucomatic, který nese označení SentronicD (obr. 2). Tento regulátor tlaku v jednom zařízení kombinuje oba bloky v podobě řízení i akčního členu. Lze ho jednoduše programovat s pomocí počítačového programu nebo pomocí tlačítek a displeje přímo na regulátoru. Díky obousměrné sběrnici lze zároveň nastavovat vlastnosti ventilu a vizualizovat odezvu výstupního tlaku. [5]

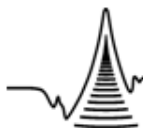


Obr.2 PID regulátor tlaku Sentronic [5]

1.2 Základní parametry regulátorů tlaku

Jak již bylo dříve v textu uvedeno, existuje velké množství druhů regulátorů tlaku, přesto ale mají tyto regulátory společné určité vlastnosti, kterými je lze vzájemně porovnávat. Základními parametry regulátorů jsou zejména:

- **Vstupní tlak**
- **Výstupní tlak**
- **Opakovatelná přesnost výstupního tlaku**
- **Objemový průtok**
- **Tlaková difference při daném průtoku**



1.2.1 Vstupní tlak

Tento parametr určuje, jak velký vstupní tlak lze přivést na vstup regulátoru, aniž by byla ohrožena funkčnost regulátoru. Nejčastěji bývá uveden v jednotkách bar, popřípadě pPascal a jeho ekvivalentech (MPa, kPa).

Dle tohoto parametru (tj. velikosti vstupního tlaku) lze rozdělit regulátory do tří kategorií.

První kategorií jsou nízkotlaké regulátory. Jsou to regulátory, které mohou pracovat se vstupním tlakem 0-20 bar. S těmito regulátory se v průmyslu setkáme nejčastěji, jelikož rozvodné sítě tlakového vzduchu jsou ve většině případů koncipované jako nízkotlaké.

Druhou variantou jsou středotlaké regulátory, u kterých je vstupní tlak do 50 bar. Tento tlak se v pneumatice používá již výrazně méně než předchozí varianta a s tímto typem regulátoru se lze nejčastěji setkat u druhého stupně potápěčského regulátoru tzv. automatiky. Kromě oblasti pneumatiky je tento tlak hojně využíván v hydraulických systémech.

Poslední variantou, se kterou se lze běžně setkat, jsou vysokotlaké regulátory, které mají vstupní tlak větší než 50 bar. V pneumatice to mohou být regulátory na tlakových lahvích, jež mají maximální plnicí tlak 200-300 bar v závislosti na typu tlakové lahve. V hydraulice to může být tlak 1000 a více barů.

1.2.2 Výstupní tlak

Obdobný popis jako pro vstupní tlak platí pro výstupní tlak pouze s několika rozdíly. Výstupní tlak z regulátoru bývá určený dvěma hodnotami v podobě maximální a minimální velikost výstupního tlaku. Tyto hodnoty u mechanických regulátorů úzce souvisejí s konstrukcí regulátoru a typem použité pružiny. U elektronických regulátorů závisí výstupní tlak zejména na měřicím rozsahu tlakového snímače a na tlakových omezeních na akční člen.

Některé regulátory jsou konstruované tak, že výstupní tlak nelze z výroby měnit, případně ho lze pouze nastavit před samotným zapojením regulátoru.

Častější variantou jsou však regulátory, u kterých lze výstupní tlak kdykoliv měnit v daném rozsahu bez nutnosti demontáže regulátoru.

1.2.3 Opakovatelná přesnost výstupního tlaku

Opakovatelná přesnost výstupního tlaku regulátoru určuje, o jak velkou hodnotu se může změnit výstupní tlak od požadovaného nastaveného výstupního tlaku v průběhu činnosti regulátoru, či v závislosti na změně vstupního tlaku. Tento parametr je zejména důležitý u systémů, pro jejichž správnou činnost je nutný stále stejný výstupní tlak. Příkladem takového systému může být tlakový list, u kterého je požadavek na stále stejnou lisovací sílu, při jejímž nedodržení se mění tvar a parametry lisované součástky. Přesnost výstupního tlaku se nejčastěji určuje v procentech, která reprezentují velikost celkové odchylky vztažené k velikosti výstupního tlaku, viz vzorec (1).

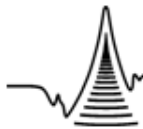
$$\Delta P = \frac{P_{ref}}{P_{min}} - \frac{P_{ref}}{P_{max}} \cdot 100 \quad (1)$$

1.2.4 Objemový průtok

Objemový průtok určuje, jak velké množství vzduchu projde regulátorem za danou časovou jednotku. Průtok regulátorem závisí především na průřezu akčního členu regulátoru, který přepouští neregulovaný tlak do regulované části, a také na aktuálním výstupním tlaku z regulátoru. Tento parametr lze vyjádřit jednoduchým vztahem (2).

$$Q_v = \frac{dV}{dT} \quad (2)$$

Velikost objemového průtoku je důležitá zejména pro aplikace, ve kterých je kladen důraz na velký průtok v relativně krátkém čase. Mohou to být například regulátory výstupního tlaku do pneumatických pístnic, u kterých je požadavek na dodržení rychlosti pohybu pístnice.

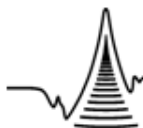


1.2.5 Tlaková difference při daném průtoku

Tlaková difference při daném průtoku je kombinace předchozích parametrů; objemového průtoku a přesnosti výstupního tlaku. Určuje, jak výrazně poklesne výstupní regulovaný tlak v závislosti na velikosti aktuálního objemového průtoku z regulátoru. Obecně pro mechanické regulátory platí, že výstupní tlak z regulátoru v klidovém stavu, tedy kdy je objemový průtok roven nule, je vyšší než výstupní tlak z regulátoru při nenulovém objemovém průtoku.

Průběh výstupního tlaku z regulátoru v závislosti na provedení akčního členu může mít lineární charakter, při kterém výstupní tlak klesá lineárně v závislosti na zvětšujícím se objemovém průtoku. Také může mít křivkový charakter, při kterém je větší pokles tlaku při menším objemovém průtoku a v závislosti na zvětšujícím se objemovém průtoku se zmenšuje pokles výstupního tlaku.

Pozornost tlakové diferenci je nutné věnovat především při výběru regulátorů, u kterých je kladen důraz zejména na jejich vlastnosti při dynamickém průběhu, tedy na průběh regulace při trvalém či měnícím se objemovém průtoku. Příkladem takové procesu může být regulace tlaku vzduchové trysky pro nástřik barvy.



2 Vlastní konstrukční řešení a volba nejvhodnější konstrukce

Na začátku každého spotřebního výrobku, stroje, zařízení či rozsáhlého investičního celku je projekt a konstruktéři, kteří určují technickou úroveň, kvalitu a výrobní náklady.

Při návrhu je nutné využívat metodiku konstruování, čímž se rozumí souhrn pracovních způsobů a vypracovaných speciálních metod optimálního postupu řešení konstrukčního úkolu. Přesto však neexistuje žádná univerzální metodika. Každý zkušený konstruktér vědomě či podvědomě používá svou vlastní metodiku, kterou si osvojil z vlastní zkušenosti, nebo si pro sebe upravil některou z publikovaných metodik. Osvojení zásad metodiky konstruování vede k systémovému a cílevědomému pojetí konstrukční práce, kdy při řešení problému vnímáme jednotlivé jevy a procesy komplexně v jejich vnitřních i vnějších souvislostech.

Již při prvním zadávání cíle, kterého by mělo dané konstrukční řešení dosáhnout, se formují první podmínky, jež se musí při návrhu dodržet. Z těchto podmínek pak dále mohou vzniknout jistá omezení, která se však dají vhodnou konstrukcí zmenšit, či zcela odstranit. Z těchto důvodů je nutné prvotnímu vytváření jednotlivých návrhů věnovat velkou pozornost. Tyto návrhy předurčují následné vlastnosti daného zařízení. Při nevhodné volbě, která se může projevit až při následném testování prototypů, je v krajním případě nutné začít vytvářet celý návrh znovu, což způsobuje nemalé nároky na další čas, finanční prostředky a morálku konstruktérů.

Před uzavřením finálního konstrukčního návrhu a přejití do další fáze v podobě výroby prototypu a jeho testování je nutné znovu zkontrolovat každou jednotlivou část návrhu, u které by mohl vzniknout jakýkoliv problém s jeho předpokládanou funkcí.

V případě, že návrh dospěl do bodu, v němž se předpokládá, že všechny funkční části návrhu budou splňovat svoji funkci, je nezbytné pohlížet na návrh z technologického hlediska možnosti výroby jednotlivých dílů konstrukčního řešení. Tato část je stejně důležitá jako část předchozí, která má zajistit funkčnost výrobku. V případě, že se v této části návrhu provede

nevhodná úvaha, případně se tato část úplně vypustí, lze očekávat problémy při vlastní výrobě prototypu, které v lepším případě vedou k větší finanční a časové náročnosti výroby prototypu, potažmo celého výrobku. V horším případě může dojít k tomu, že není možné návrh fyzicky realizovat a je nutné celý navrhovaný koncept přepracovat.

Závěrem lze říci, že konstruktér by měl nejen dbát na funkční stránku konstrukčního návrhu, ale také na to, aby bylo možné návrh fyzicky realizovat. Pokud možno s vlastní dostupnou technologií a způsobem, který by byl ohleduplný k časové a technologické náročnosti a tím i k ceně výroby.

V praxi se tento způsob často může řešit oddělenými profesemi v podobě konstruktéra, technologa a případně materiálového inženýra, kteří spolu vzájemně komunikují, a tím zajišťují vhodnost návrhu dle všech předchozích zásad. Přesto by konstruktér i v těchto podmínkách měl mít základní znalosti o výrobních a materiálových možnostech, a tím již při návrhu konstrukce předcházet vzniku všech možných problémů.



Obr.3 Schéma postupu řešení konstrukčního úkolu [3]

Schematický popis jednotlivých úkonů je patrný na obr. 3. Mezi jednotlivými body při realizaci projektu je často nutné posunout se zpět pro dosažení požadovaných cílů. Tento postup mnohdy nastane při prvních testech prototypu, u kterých se objeví nevyhovujícím výsledky. Poté je nutné

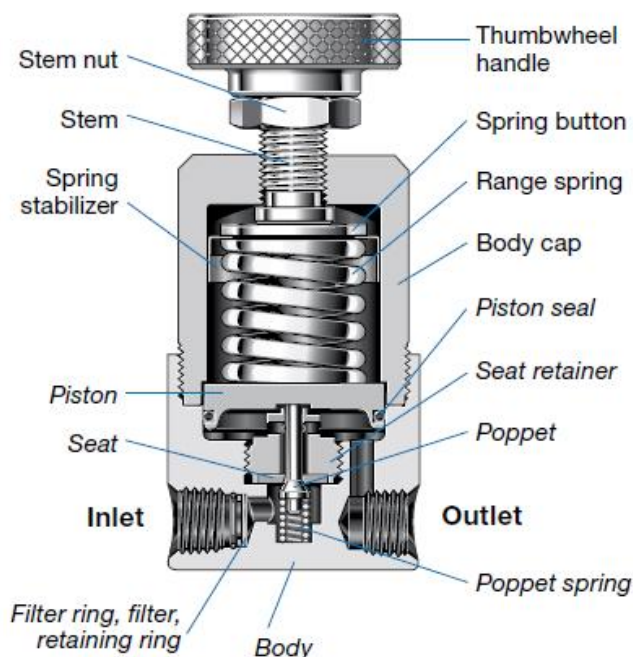
upravit návrh, vybrat nové varianty nebo koncepční řešení. Návrat ve schématu také může nastat při řešení samotné výroby a jejího zefektivnění či zlevnění.

2.1 Vytvoření možných variant konstrukce

Existuje velké množství konstrukcí regulátoru tlaku, což dokazuje i velký počet jednotlivých druhů tlakových regulátorů a redukčních ventilů. Některé základní druhy byly popsány v kapitole 1.1.

Následující kapitola je zaměřena pouze na mechanické konstrukce regulátorů tlaku, které i přes stále se snižující ceny elektronických součástí zůstávají výrazně levnější, což je jeden z hlavních důvodů, proč se stále ve velké míře v průmyslu používají.

Z možných variant konstrukčního řešení byly na základě analýzy průmyslově dostupných regulátorů vyloučeny typy regulátorů s regulací tlaku pomocí klasického sedla ventilu a kuželky, která je patrná na obr. 4.



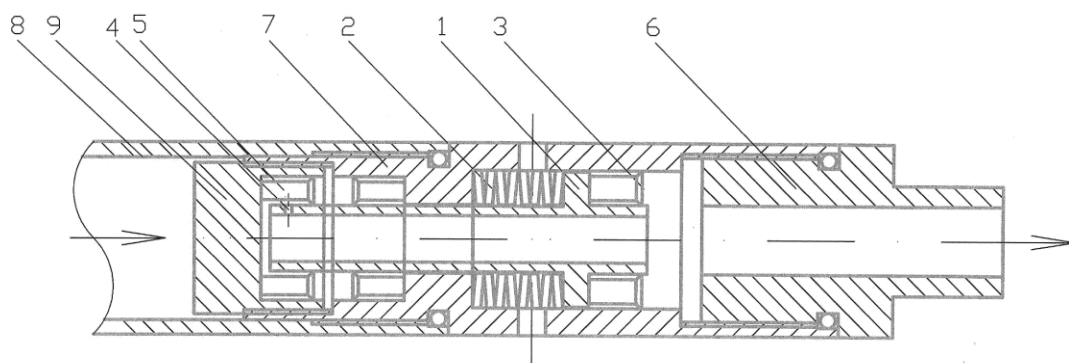
Obr.4 Vysokotlaký regulátor firmy Swagelog [6]

Tento návrh byl vyloučen na základě toho, že nebyla objevena vhodná úprava mechanismu, která by způsobila zefektivnění tohoto systému regulace.

Z těchto důvodů bylo přistoupeno k využití regulačního systému v podobě dutého pístu s kanálkem a těsnící manžetou, jehož původní návrh je vidět na obr. 5. Následnou reálnou podobu tohoto regulátoru je možné vidět na obr. 6.

Provedení regulátoru tlaku znázorňuje návrhový výkres (obr. 5), který ukazuje regulátor tlaku v podélném řezu. Těleso 7 regulátoru tvoří vysoustružená tyčovina, na níž je závitem přichycen tlakový zásobník 8 a uzavírací ventil 6. Ve středu tělesa 7 je vytvořen válec pro talířovou pružinu 2 s dutým pístem 1, na němž je uchyceno pístové těsnění 3. Na konci tělesa 7 je závitem přichycena seřizovací matice 9, ve které se nachází pístnicové těsnění 5, pod kterým je přepouštěcí kanálek 4.

Regulátor tlaku pracuje tak, že při zvyšování tlaku v prostoru za dutým pístem 1 vyvolá tlak působící na pístové těsnění 3 sílu, která působí proti talířové pružině 2. Talířová pružina 2 se začne stlačovat, čímž se začne pohybovat dutý píst 1 a po překročení dané síly talířové pružiny 2 se zasune přepouštěcí kanálek 4 pod pístnicové těsnění 5, a tím zamezí zvyšování tlaku za dutým pístem 1. Při snižování tlaku za dutým pístem 1 se začne pružina 2 roztahovat, čímž odsouvá dutý píst 1, a tím vysune přepouštěcí kanálek 4 zpod pístnicového těsnění 5, čímž je opět umožněno pronikání tlakového vzduchu za dutý píst 1. Regulovanou výši tlaku lze měnit změnou tvrdosti pružiny 2 nebo posunem seřizovací matice 9. [4]



Obr.5 Návrhový výkres [4]

Seznam vztahových značek

- 1 – dutý píst
- 2 – talířová pružina
- 3 – pístové těsnění
- 4 – přepouštěcí kanálek
- 5 – pístnicové těsnění
- 6 – uzavírací ventil
- 7 – těleso
- 8 – tlakový zásobník
- 9 – seřizovací matice



Obr.6 Reálná podoba předlohy využitá pro navrhovaný regulátor [4]

2.1.1 Nutné podmínky konstrukce

Podmínky konstrukce jsou svázány především s podmínkami parametru regulace, jaké chceme dosáhnout. Tedy pokusit se docílit stavu, při němž jsou dobré kvalitativní vlastnosti regulace, a to zejména vysoká opakovatelná přesnost regulace, velký objemový průtok a malá tlaková difference při odběru regulovaného vzduchu.

Podmínky konstrukce mohou být svázány i s parametry vstupního a výstupního tlaku, a to především v situaci, kdy chceme konstruovat vysokotlaké regulátory tlaku. Dle toho je tedy vhodné zvolit typ materiálu a tloušťku jednotlivých stěn, aby byla konstrukce zohledněna z hlediska pevnosti a maximálního povoleného tlakového namáhání jednotlivých součástí. K výpočtu nutné tloušťky stěny při daném materiálu lze použít jednoduchý vzorec daný vztahem (3). [10]

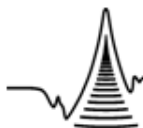
$$t_s = \frac{D_n * P * S}{2 * R_e} \quad (3)$$

Dle základní koncepce požadavku regulátoru pro průmyslové aplikace se předpokládá, že regulátor bude pracovat v rozvodné síti stlačeného vzduchu, která je v drtivé většině případů koncipovaná na tlak 0-10 bar. Z tohoto důvodu se podmínka konstrukce na tloušťku stěn a typ materiálu výrazně zjednodušuje. Přesto je nutné, a to především při větších vnitřních průměrech součástky a s ohledem na bezpečnost, provést výpočet podle vztahu (3) i pro tato nízkotlaká zařízení.

2.1.2 Výrobní parametry konstrukce

Materiál je základním stavebním kamenem každého výrobku. Proto jeho správná volba bývá často klíčovým prvkem.

Důležitou vlastností materiálu součástek, které se používají v tlakových zařízeních, je pevnost v tlaku a tahu. Jelikož jsou tyto součástky často namáhány vysokými silami, je nutné s ohledem na bezpečnost zajistit,



aby nebyla překročena mez kluzu, kdy by došlo k trvalé deformaci součástky. Zároveň je kladen důraz na dobrou odolnost proti korozi, která je prostřednictvím vlhkosti často přítomna ve stlačeném vzduchu v rozvodné síti a může způsobit zeslabení stěny a tím snížit pevnost materiálu. [4]

Ze skutečností popsaných v předchozí kapitole je zřejmé, že u této konstrukce nebude nutné, vzhledem k relativně nízkým vstupním a výstupním tlakům a tedy silám na jednotlivé díly regulátoru, používat vysokopevnostní materiály. Na základě toho je možné stanovit jako ideální materiál pro výrobu prototypu slitiny hliníku. Obecně jsou označovány jako dural, který vyniká velmi dobrou obrobiteľností, nízkou hmotností, velmi dobrou odolností proti korozi a dobrým poměrem objem/cena, jenž je výrazně lepší než při použití jiných neželezných kovů, například mosazi či mědi.

Po volbě vhodného materiálu je nutná správná volba výrobního (technologického) postupu, který zajistí požadované vlastnosti konstrukčního návrhu a často výrazně ovlivní ekonomičnost výroby. Mezi nejčastější technologické postupy patří slévání, tváření, dělení, obrábění a spojování.

Při výrobě tlakových zařízení se pro výrobu prvotního polotvaru nejčastěji využívá slévárenských a tvářecích postupů, poté jsou jednotlivé díly přesně obráběny do požadovaných tvarů a spojovány do funkčních celků rozebíratelnými i nerozebíratelnými spoji. Díky tomuto postupu lze docílit hospodárnější výroby, jak z hlediska úspory materiálu, tak i nižší časové náročnosti výroby.

Postup popsaný v předchozím odstavci se především používá pro sériovou výrobu. Při výrobě prototypu je výroba omezena především na konvenční obráběcí stroje a běžně dodávané polotovary v podobě tyčí, trubek a jiného hutního materiálu.

2.2 Konkrétní typy konstrukčního řešení

Praktickou částí této diplomové práce je návrh a realizace průmyslového regulátoru výstupního tlaku vzduchu, který by bylo možné použít v běžné

nízkotlaké rozvodné sítě stlačeného vzduchu, jako tlakový regulační prvek u kompresoru či tlakového zásobníku vzduchu.

V následujících podkapitolách budou představeny dva návrhy, které koncepčně vycházejí z návrhu představeného v předchozí kapitole (obr. 5).

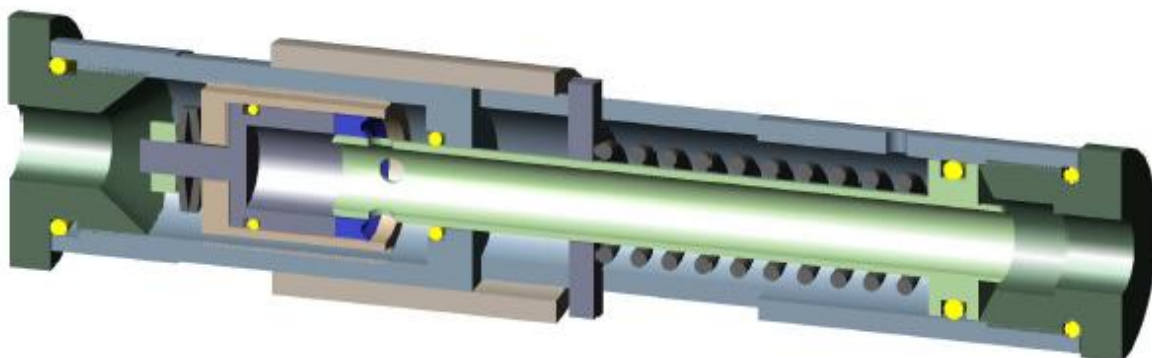
2.2.1 První varianta - Podélný regulátor tlaku

První varianta je koncepčně blíže původnímu návrhu než varianta druhá. Vskrze se jedná o přebudování původního vysokotlakého regulátoru, ke kterému je přidán mechanický systém pro změnu požadovaného výstupního tlaku přímo za provozu regulátoru, tedy bez nutnosti jeho demontáže z obvodu tlakového vzduchu, jako tomu bylo u původního konceptu. Zároveň je navrhovaný regulátor oproti původní verzi vybaven vstupními a výstupními závitovými otvory pro připojení do tlakového systému. Původní návrh tyto závitové otvory neobsahoval, jelikož byl přímo určen pro konkrétní tlakový systém a uchycení přívodů a vývodů bylo zakomponováno přímo do těla regulátoru v podobě specifických závitů.

Další rozdíl oproti původnímu návrhu je především v požadavcích na rozsah pracovních tlaků regulátoru, jeho objemovém průtoku a vlastnostech regulace. Původní regulátor byl určen pro vstupní tlak 200 bar a výstupní tlak 0-130 bar, tzn. pro vysokotlakou techniku s malým objemovým průtokem a s požadavkem na vysokou přesnost výstupního tlaku v ustáleném stavu, tj. v době bez odběru regulovaného vzduchu. Naopak nepodstatný parametr byla tlaková diference při odběru vzduchu.

Požadavek na tlakové rozmezí navrhovaného regulátor byl o řád menší, tedy vstupní maximální tlak 10-20 bar a výstupní tlak 0-10 bar s možností velkého objemového průtoku vzduchu při malé tlakové diferenci.

Základní koncept vytvořený v CAD aplikaci v osové 3D řezu, je vidět na obr. 7.

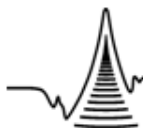


Obr.7 Návrhový výkres v osovém 3D řezu

Na základě rozdílných požadavků byl nahrazen původní pružný element tvořený talířovými pružinami vinutou pružinou, která má výrazně menší tuhost. Touto úpravou se dosáhne vysoké citlivosti i u malého poklesu výstupního tlaku a rychlého průběhu regulačního pochodu, který zabezpečí rychlé vyrovnaní tohoto tlakového poklesu a navrácení výstupního regulovaného tlaku na požadovanou hodnotu.

Pro zajištění většího objemového průtoku byl přepouštěcí kanálek označený číslem 4 na obr. 5 původního návrhu nahrazen čtyřmi většími otvory, které jsou rovnoměrně vytvořeny po obvodu dutého pístu se vzájemným úhlovým posuvem 90° . Tyto otvory byly zvětšeny z původního průměru 1 mm na průměr 3 mm. Každý kanálek, co se týče průtočného průřezu, byl tedy zvětšen o 900%.

Samotný základní princip činnosti zůstává zachován a je obdobný s popisem v původním návrhu. Dutý píst (vyznačený zelenou barvou) se čtyřmi otvory v podobě kanálku se vlivem tlakového působení vzduchu působícího proti vinuté pružině postupně posouvá směrem pod modrou těsnící manžetu. Tento stav trvá do té doby, dokud nenastane rovnováha mezi silou vinuté pružiny a tlakovou silou působící z levé strany na dutý píst.



Tato rovnováha může nastat pouze v případě, že neprochází žádný neregulovaný vzduch do prostoru s regulovaným tlakem, a proto musí být zajištěno dokonalé utěsnění mezi těsnicí manžetou a dutým pístem, a zároveň nesmí být z prostoru s regulovaným vzduchem odpouštěn vzduch. V případě, že se z prostoru s regulovaným vzduchem začne odpouštět vzduch, tak síla vinuté pružiny překoná tlakovou sílu a začne dutý píst odsouvat směrem od těsnicí manžety, čímž otevře průchod pronikání neregulovaného vzduchu skrz přepouštěcí kanálky dutého pístu. Čím větší je pokles tlaku v regulované části, tím více se píst odsune, a tím větší vznikne průtok skrz přepouštěcí kanálky, jelikož se zvětší průtočná plocha mezi neregulovanou a regulovanou částí regulátoru.

Nastavení hodnoty požadovaného výstupního tlaku se provádí otáčením vnějšího válce, který se nachází na obvodu těla regulátoru. Tímto otáčením dochází k tomu, že se vnější válec vyšroubovává nebo zašroubovává, a tak se lineárně posouvá v ose regulátoru, čímž přes vodící úchyt předepíná či zeslabuje vinutou pružinu. Podle velikosti předpětí pružiny se mění velikost výstupního tlaku. Čím je pružina více předepnutá, tím vytváří větší sílu působící na píst a k dosažení rovnovážného stavu je nutná větší tlaková síla, a tedy větší tlak vzduchu v regulované části. Při zeslabování pružiny je princip opačný.

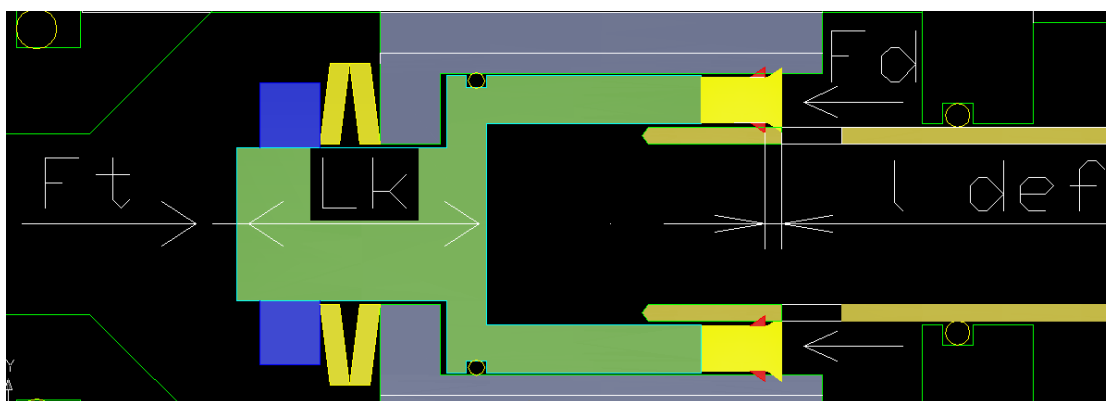
Návrh zároveň oproti původnímu návrhu obsahuje dvě nové samostatné funkce v podobě kompenzace tlakové deformace těsnicí manžety a ochranného ofukovacího kanálku.

První z těchto funkcí je kompenzace tlakové deformace těsnících manžet. Tato deformace, v případě jejího nekompenzování, způsobuje změnu výstupního tlaku při změně vstupního tlaku, jelikož těsnicí manžeta je při větším vstupním tlaku více stlačená, čímž dochází k tomu, že se břit těsnicí manžety posune směrem od přepouštěcích kanálků. Z těchto důvodů se musí pružina více stlačit, aby se zasunul přepouštěcí kanálek pod břit pružiny. Tohoto většího stlačení je možné dosáhnout jen tehdy, pokud se zvětší výstupní tlak, a tedy i tlaková síla na pružinu. Naopak při poklesu vstupního tlaku se těsnicí břit manžety posune směrem k přepouštěcím kanálkům

dutého pístu a pro zasunutí přepouštěcích kanálku je potřeba menšího stlačení pružiny, a tedy menší výstupní tlak.

Tyto protichůdné stavy při různých vstupních tlacích mohou způsobit změnu výstupního tlaku dle popsaných pravidel v předchozím textu. Změna výstupního tlaku je tím větší, čím větší je rozdíl mezi minimálním a maximálním vstupním tlakem.

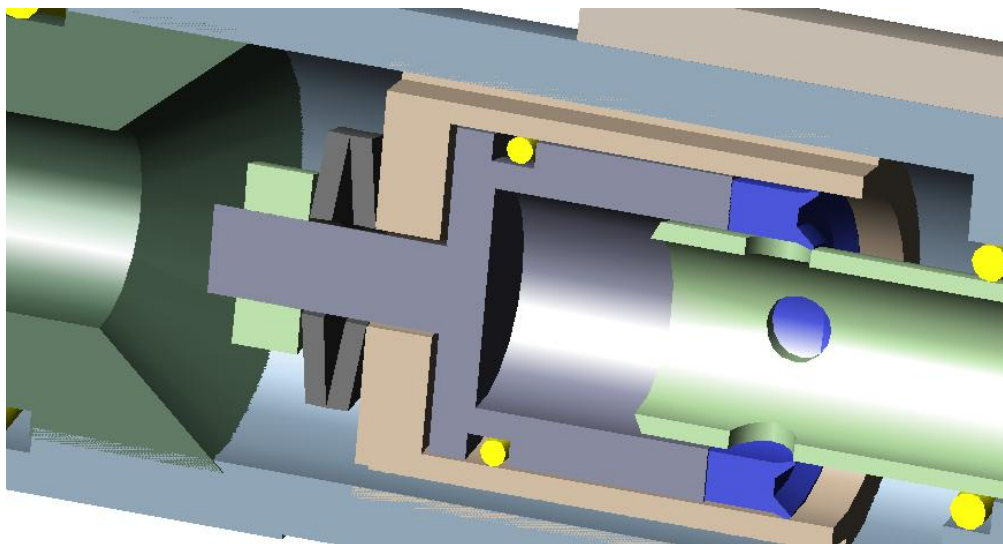
Diagram působících sil a příslušných posunutí je vidět na obr. 8. Zde je patrná deformační síla F_d , která vyvolá deformaci o délce l_{def} . Na kompenzační mechanismus působí tlaková síla F_t , která způsobí posun kompenzačního pístu a tedy i těsnící manžety o vzdálenost l_k . Obě tlakové síly F_d a F_t závisí na vstupním tlaku do regulátoru a na ploše, na kterou působí. Pokud se mění vstupní tlak, mění se obě tlakové síly zároveň.



Obr.8 Diagram působících sil a příslušných posunutí

Detailní náhled kompenzace je na obr. 9. Kompenzace spočívá v tom, že se těsnící manžeta opírá o pohyblivý píst, na který působí z jedné strany neregulovaný vstupní tlak a z druhé strany regulovaný výstupní tlak. Na základě těchto rozdílů tlaku vzniká tlaková síla, která se snaží píst posunout směrem k dutému pístu. Proti pohybu pístu je píst na straně s neregulovaným vzduchem zajištěn talířovými pružinami, které se stlačí a tím posunou píst o vzdálenost, která je závislá na velikosti tlakové síly a zvolené tuhosti talířových pružin. Tato síla je tím větší, čím větší je vstupní tlak. Čím větší je vstupní tlak, tím více se posune píst a těsnící manžeta.

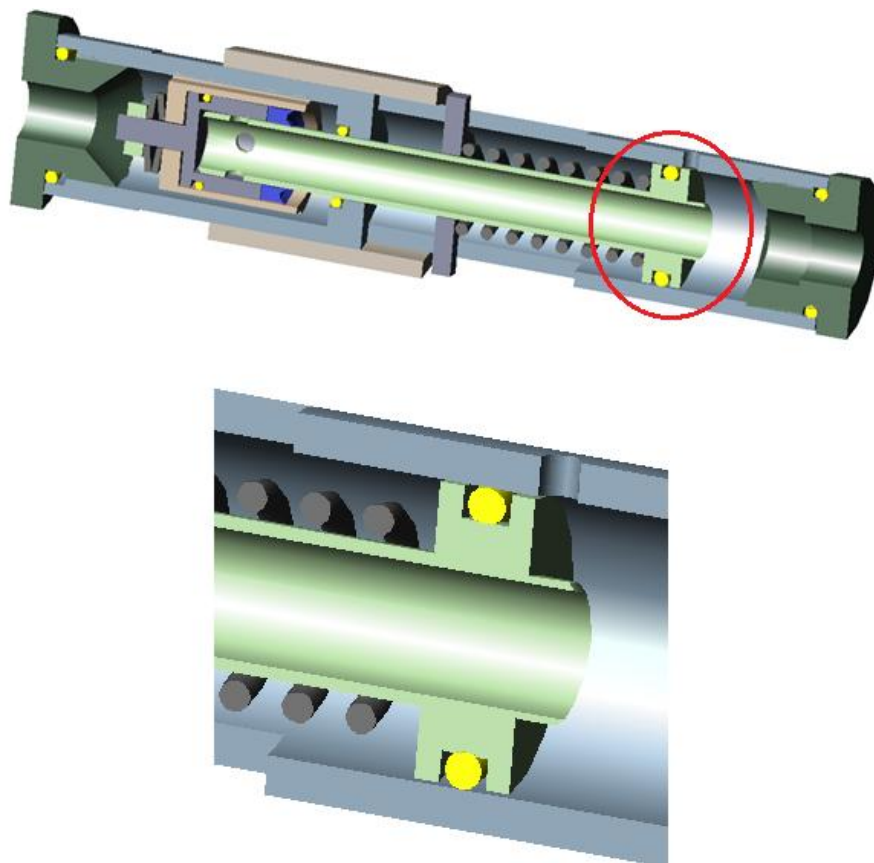
Pro správnou funkci kompenzace deformace manžety stačí, aby posun pístu s manžetou při daném tlaku odpovídal její deformace (zkrácení) při daném tlaku, a tím se vzájemně vyrušil posuv těsnícího břitu manžety, a tedy jeho vlivu na změnu výstupního tlaku.



Obr.9 Kompenzace deformace manžety, 3D řez

Druhá funkce zajišťuje to, aby nebyl překročen nastavený výstupní tlak v případě poruch regulátoru, a tedy aby nebylo ohroženo zařízení na výstupu regulovaného vzduchu. Tuto funkci zajišťuje odpouštěcí kanálek vytvořený v těle regulátoru v těsné blízkosti těsnění pístu, který odděluje prostor s pružinou od prostoru s výstupním tlakem.

Princip spočívá v tom, že v případě poškození břitu těsnící manžety, případně vniknutí nečistoty mezi břit a dutý píst, který by způsobil netěsnost, a tedy i neregulované pronikání vstupního tlaku do prostoru regulovaného tlaku, dojde k tomu, že se dutý píst začne vlivem zvětšujícího tlaku dále posouvat (obr. 10), až se zasune jeho těsnící o-kroužek pod odpouštěcí kanálek a tímto kanálkem se začne odpouštět nežádoucí tlakový vzduch. Tento stav bude trvat do té doby, dokud bude v prostoru s regulovaným vzduchem větší tlak, než jaký byl požadovaný. Tímto systémem se tedy zajistí ochrana zařízení, které by mohl neregulovaný tlak poškodit či zničit, a dokonce ohrozit i jejich obsluhu.



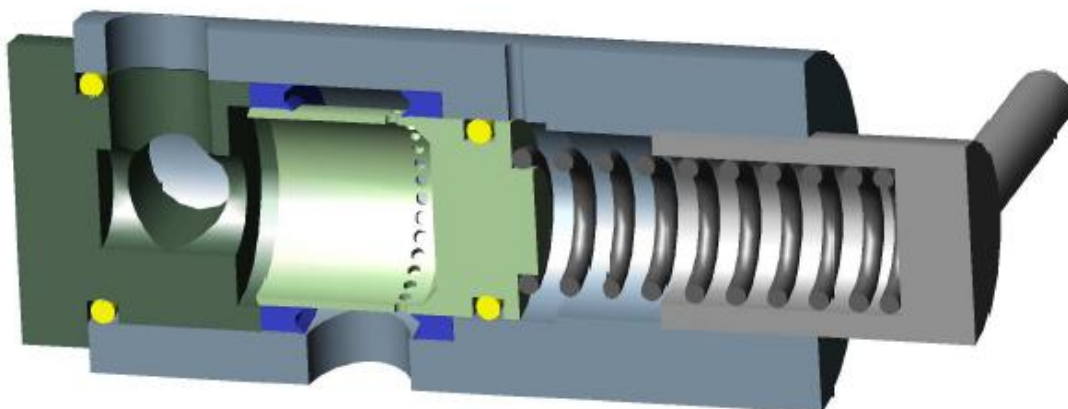
Obr. 10 Funkce ochranného odvzdušňovacího kanálku

2.2.2 Druhá varianta - Kolmý regulátor tlaku

Druhá varianta nevznikla na základě předchozího návrhu a byla vytvořena jako zcela nový návrh pouze s využitím mechanismu regulace v podobě bříty těsnící manžety a pístu s přepouštěcími kanály.

Při návrhu této koncepce byl kladen důraz především na možnost dosažení většího průtoku vzduchu s menší tlakovou diferencí. Zároveň byla snaha o vytvoření kompaktnějšího regulátoru s možností lepšího uchycení do stávajících rozvodných sítí tlakového vzduchu a v neposlední řadě také k jednoduššímu způsobu výroby a úspoře materiálu.

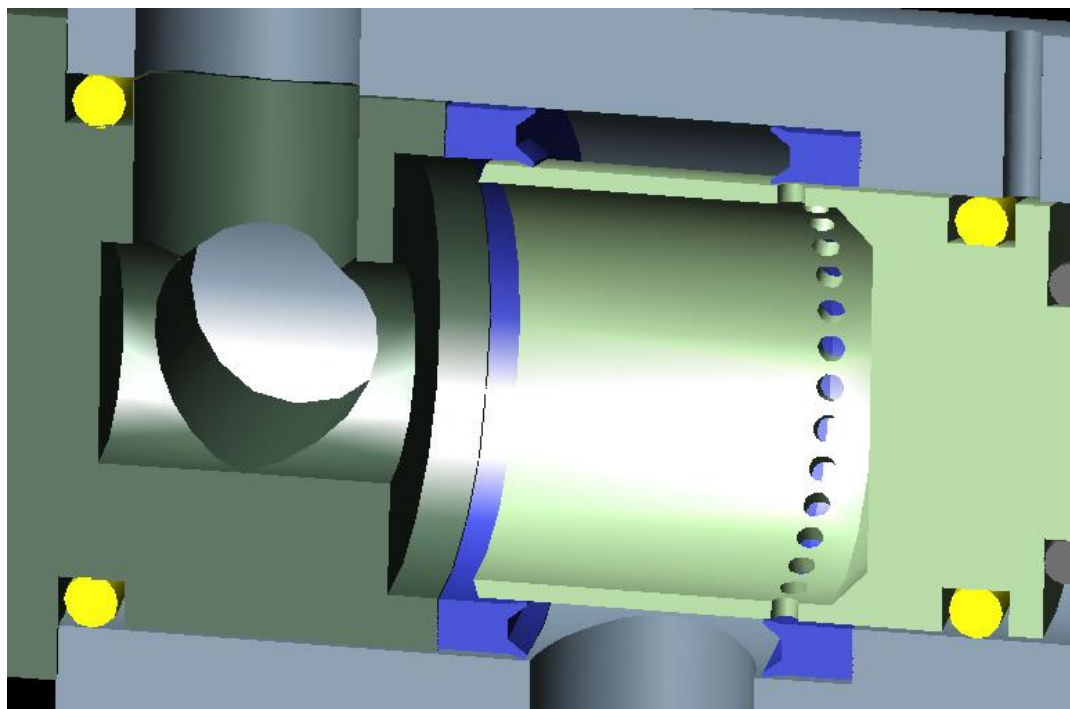
Základní koncept druhé varianty v 3D osovém řezu je vidět na obr. 11.



Obr.11 Návrhový výkres druhé varianty v osové 3D řezu

Základní tvar je tvořen dutým válcem, ve kterém jsou zasunuty jednotlivé díly regulátoru v podobě těsnících manžet, pístu s přepouštěcími kanálky a vinuté pružiny s přitlačným šroubem. Vše uvnitř uzavírá víko se závitů pro připojení manometru a úchyty pro vývod vzduchu.

Jak již bylo naznačeno, základní princip regulace zůstal totožný s první variantou. Změna nastala především ve tvaru a velikosti dutého pístu, který je v této variantě tvořen válečkem o větším průměru v poměru k jeho výšce ve srovnání s první variantou, a který již není osově průchozí. Byl změněn i systém přepouštěcích kanálků vyvrtaných rovnoměrně po obvodu, které jsou tvořeny malou dírkou o průměru 1,2 mm a jejich počet je přímo úměrný vnějšímu průměru pístu. V tomto případě byl počet kanálků stanoven na 30. Díky této změně by měl být regulátor citlivější a zároveň rychleji reagovat na odběr regulovaného vzduchu a jeho pokles v regulované části. Tato změna je dána především tím, že pro maximální otevření průtoku regulátorem je nutné posun pístu s kanálky pouze o vzdálenost 1,2 mm. Detailnější náhled přepouštěcích kanálků je na obr. 12.



Obr. 12 Detailní zobrazení kanálků dutého pístu, osový 3D řez

U tohoto návrhu byl zvolen konvenčnější systém nastavování požadovaného výstupního tlaku, jehož obdoba se používá u běžně vyráběných regulátorů tlaku. Výstupní tlak se zde ovládá otáčením nastavovacího šroubu, který je umístěn v horní části regulátoru a pro snadnější úchop a otočení je opatřen příčnou tyčkou. Zašroubováním, či vyšroubováním se mění předpětí vinuté tlačné pružiny, a tím se mění, jako v předchozí variantě, požadovaný výstupní tlak z regulátoru.

Tato varianta také obsahuje ochranný prvek v podobě odpouštěcího kanálku jako předchozí varianta, který plní stejnou funkci obdobným způsobem. Provedení odpouštěcího kanálku, který se nachází u těsnícího o-kroužku pístu v horním rohu nákresu, je dobře patrné na obr. 12.

U tohoto návrhu nebyla provedena kompenzace deformace těsnící manžety, jelikož bylo předpokládáno, že pro daný vstupní tlak 0-10 bar nebude docházet k takové deformaci těsnící manžety, která by měla měřitelný vliv na samotný regulační pochod.

2.3 Volba nejvhodnější konstrukce z možných variant

V předchozí kapitole byly představeny dvě varianty konstrukce regulátoru tlaku. Z těchto variant na základě jednotlivých parametrů je možné určit, která konstrukce by měla být vhodnější pro vytvoření prototypu regulátoru. Parametry, jež budou určovat vhodnost či nevhodnost jednotlivých variant, budou zejména regulační vlastnosti, které jsou pro návrh velmi důležité a následně parametry týkající se provozních a výrobních možností jednotlivých variant. Oba parametry jsou důležité a vždy záleží na konkrétních podmínkách zadavatele, aby rozhodl jaké parametry jsou pro něj důležitější.

Jelikož tato diplomová práce byla koncipovaná v podobě obecnějšího zadání bez specifikace na konkrétní tlakový systém, budou realizovány obě varianty v podobě prototypů, na kterých se následně provedou jednotlivá měření a zjistí se jejich provozní vhodnost či nevhodnost.

2.3.1 Volba konstrukce dle parametru regulace

Pro porovnání jednotlivých variant lze využít parametry regulace, které jsou popsány v kapitole 1.2. Z těchto parametrů nelze přímo určit, který parametr je důležitější než jiný, protože některé parametry jsou pro daný systém důležitější než jiné a pro další systém může platit něco zcela jiného. Při srovnávání můžeme předem vyloučit parametry vstupního a výstupního tlaku, které jsou pro oba regulátory stejné, a veskrze se předpokládá, že oba regulátory budou pracovat se vstupním tlakem 0-10 bar a s obdobným výstupním tlakem. Zbývající parametry jsou rozepsány v následujících bodech:

- **Opakovatelná přesnost výstupního tlaku**

U obou konstrukcí je použit stejný regulační základ, proto lze předpokládat, že obě varianty budou mít obdobnou opakovatelnou přesnost. Je však nutné poukázat na to, že první varianta má kompenzační mechanismus deformace těsnící manžety, a tak by mohla mít o něco lepší opakovatelnou přesnost výstupního tlaku.

- **Objemový průtok**

Závisí především na průtočném množství přepouštěcími kanálky. Při aplikaci výpočtových vzorců z kapitoly 1.2.4 lze dojít k výsledkům, že podélný regulátor tlaku se 4 kanálky o průměru 3 mm bude mít průtokový průřez $28,3 \text{ mm}^2$ a kolmý regulátor tlaku s počtem třiceti kanálků o průměru 1,2 mm bude mít průtokový průřez $33,9 \text{ mm}^2$. Výpočty nezahrnují vlastní dynamiku tlakového vzduchu a tlakové ztráty, přesto lze na základně většího průtokového průřezu přepouštěcích kanálků předpokládat, že objemový průtok bude mít větší druhá varianta návrhu.

- **Tlaková difference při daném průtoku**

Říká, jak výrazně se bude měnit výstupní tlak při různém objemovém průtoku vzduchu regulátorem. Tlakovou diferencí výrazně ovlivňuje citlivost regulátoru na změnu výstupního tlaku, tzn. jak rychle a přesně dokáže reagovat na změny výstupního tlaku. Citlivost ovlivňuje tuhost pružiny, která je ale u obou verzí obdobná. Druhou podstatnou věcí ovlivňující citlivost je poměr posunutí pístu s přepouštěcími kanálky v závislosti na jeho dodávaném objemovém průtoku. U první varianty je tento poměr $1/3$, tzn. že pro plný objemový průtok je nutné posunout píst o 3 mm. U druhé varianty je tento poměr $1/1,2$ a je tedy nutné pro plný průtok posunout píst pouze o 1,2 mm.

Z jednotlivých parametrů vyplývá, že by druhá varianta měla mít výrazně lepší regulační vlastnosti především u tlakové difference a o něco větší objemový průtok než první varianta. První varianta by naopak měla mít částečně lepší opakovatelnou přesnost regulace.

2.3.2 Volba konstrukce dle výrobních a provozních vlastností

Regulační parametry regulátoru jsou velmi důležité, pokud ale bude mít daný regulátor omezené použití, například z důvodů nevhodné tvaru či velké výrobní náročnosti, popřípadě nižší životnosti, pak se může stát, že tento regulátor i přes své výborné regulační vlastnosti nebude možné aplikovat. Místo tohoto regulátoru se bude muset použít jiný regulátor s horšími regulačními vlastnostmi, který ale vyniká svými výrobními či provozními vlastnostmi. Je tedy patrné, že tyto vlastnosti regulátoru jsou neméně důležité jako parametry popsané v předchozí kapitole.

Nejprve se zhodnotí možnost výroby pro jednotlivé varianty. Při takovémto porovnávání je nutné zahrnout náročnost výrobních operací pro výrobu jednotlivých dílů vzhledem k nutnému strojnímu vybavení, počet jednotlivých dílů a množství materiálu. To platí za předpokladu, že jsou všechny díly vyrobeny konvenčním obráběním materiálu z neželezných kovů, především slitin hliníku. Výrobní podmínky jsou rozepsané v následujících bodech:

- **Strojní vybavení**

U obou konstrukcí se předpokládá výroba na CNC soustruhu a CNC frézce, případně na obráběcím centru, které kombinuje jak CNC soustruh tak CNC frézku do jednoho stroje. Mezi oběma variantami je však rozdíl v požadavcích na CNC soustruh, který je popsán v následujícím bodě.

- **Náročnost výrobních operací**

Přestože je každý díl jinak náročný na možnosti stroje, jeho vybavení a strojní čas, lze říci, že u většiny dílů jednotlivých variant je tato náročnost obdobná. Toto posouzení však neplatí pro hlavní díly v podobě těla regulátorů.

Při porovnání těla regulátorů (obr. 13) je nejdůležitější rozdíl v tom, že tělo druhé varianty lze vyrobit tzv. na jedno upnutí, tedy není nutné obrobek vyndávat a znovu uchycovat do kleštín vřetene. U druhé varianty je toto uchycení nutné, jelikož v 1/3 těla je vytvořena přepážka, která zabraňuje obrobení vnitřního prostoru za přepážkou. Tato konstrukce

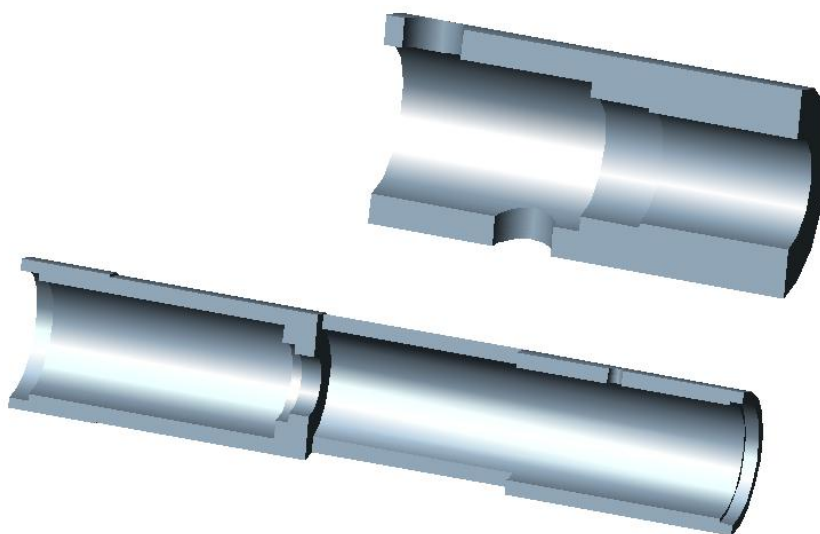
tedy klade větší nároky na obsluhu, případně na nutnost použití soustruhu se dvěma vřeteny a dvěma revolverovými hlavami, jež umožňují výrobu i této součásti bez nutnosti zásahu obsluhy stroje.

- **Počet jednotlivých dílů**

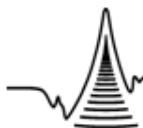
Při posuzování počtu jednotlivých dílů je nutné brát především díly, které by se strojově vyráběly. Díly v podobě těsnění a pružin tvoří jen velmi malou část nákladů, a proto do tohoto srovnání nejsou započítány. První varianta obsahuje celkem 9 dílů, které tvoří základní konstrukci. Oproti tomu druhá varianta obsahuje pouze 4 díly, což výrazně přispívá k redukci výrobních nákladů.

- **Množství materiálu**

Největší množství materiálu se spotřebuje na samotné tělo regulátoru. Při předpokladu výroby z plného tyčového materiálu se spotřebuje o 13% více materiálu u druhé varianty. Pokud však při srovnání vezmeme materiál pro výrobu všech dílů, tak na výrobu dílů první varianty se spotřebuje o 32% více materiálu, což je dáno větším množstvím a také tvarem těchto dílů.



Obr. 13 Těla regulátorů obou variant



Při celkovém srovnání je patrné, že druhá varianta je z hlediska výrobních nákladů výrazně lepší volbou, protože obsahuje o více než 50% méně dílů a na její výrobu není potřeba použít speciálního CNC soustruhu či častějšího zásahu obsluhy a zároveň je spotřebováno o 32% méně materiálu ve srovnání s první variantou.

Při srovnání obou variant návrhu dle provozních vlastností je nutné zohlednit to, že při návrhu nelze zcela přesně odhadnout parametry v podobě opotřebení jednotlivých dílů či těsnění. Z těchto důvodů bude provedeno porovnání především z hlediska vhodnosti uchycení do tlakového systému a možnost obsluhy regulátoru.

Lze říci, že první varianta je spíše vhodná pro centrální regulaci tlaku, například v potrubním systému, jelikož ji lze přímo uchytit mezi dva konce potrubí i v místě, kde je omezený prostor. Zároveň není nutné složité uchycení, jelikož vstup i výstup jsou v jedné ose. Při použití jako koncového regulačního členu ale není první varianta příliš vhodná, protože má pouze jeden otvor pro výstupní regulovaný vzduch, což omezuje připojení manometru či vytvoření rozvodu pro více tlakových zařízení.

Druhá varianta je naopak vhodná především jako koncový regulační člen, což je dáno především větším počtem výstupních a popřípadě i vstupních otvorů pro připojení dalších tlakových zařízení včetně manometru pro snadné sledování a nastavování výstupního tlaku.

Obě varianty, přestože mají jiný systém ovládání výstupního tlaku, lze ovládat velmi podobně a každý způsob ovládání je vhodný v závislosti na způsobu uchycení regulátoru pro jednotlivá zařízení.

3 Způsob výroby prototypu a možnosti sériové výroby

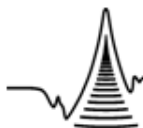
Způsob výroby prototypu se od sériové výroby diametrálně liší. Při výrobě prototypu se častěji používají konvenční stroje ovládané ručně, pokud to tvar součástky dovoluje. Důvod je ten, že tímto způsobem se často dosáhne rychlejší a hospodárnější výroby. Je to dáno především tím, že naprogramování CNC stroje a jeho seřízení na výrobu dané součástky je časově náročnější než kusová výroba, například na univerzálním soustruhu či ruční frézce. Zároveň je nutné zohlednit využití strojového parku, jelikož cena CNC stroje a tedy i jeho hodinová sazba bývá několikanásobně větší než cena univerzálního soustruhu. U výroby prototypu se také předpokládá, že nastane nutnost danou součástku po vyzkoušení upravit, či vyrobit novou s určitou úpravou, což se také rychleji provede na ručních strojích.

3.1 Postup při výrobě prototypu

Při výrobě prototypu je nejprve nutné z návrhového výkresu vytvořit výrobní výkres a celkovou výkresovou dokumentaci, podle které je možné jednotlivé díly prototypu vyrobit. Samotný návrh již často přímo obsahuje tvar a rozměry jednotlivých součástí, a je tedy nutné pouze tento tvar zanechat na samostatný výkres a přidat k němu veškeré potřebné náležitosti, které má výkres obsahovat. Všechny rozměry pro výrobu je potřeba okótovat, ideálně tak, aby výrobce nemusel žádný rozměr dopočítávat z ostatních údajů. Výkres zároveň musí obsahovat i tolerance pro jednotlivé rozměry, drsnosti povrchu, souosost jednotlivých děr, sražení hran, atd., které je nutné dodržet, aby součástka splňovala předpokládanou funkci. Tyto údaje mohou mít zásadní vliv na funkčnost, ale také na cenu výroby jednotlivých dílů. Pokud není určitý délkový rozměr příliš podstatný, nemá smysl tento rozměr kótovat s tolerancí dvou setin milimetru, popřípadě volit drsnost povrchu, které se dá docílit pouze výstružníkem, a jejíž jediný výsledek by vedl k vyšším výrobním nárokům, a tím i ceně výroby. Příklad výrobního výkresu se nachází na obr. 14.



45



Obr.15 Stolní soustruh CQ9318 a stolní frézka na kov FM-16

Na výrobu první varianty byl zvolen mosazný materiál CuZn40Pb2, který se běžně používá pro konvenční obrábění a vyniká zejména svými mechanickými vlastnostmi a dobrou obrobiteľností. Zároveň má částečnou odolnost proti korozi. Hlavním důvodem volby tohoto materiálu byla jeho aktuální dostupnost a zkušenosti s jeho použitím a obráběním. Výroba byla provedena dle výrobních výkresů. Výsledný regulátor ve složeném stavu je možné vidět na obr. 16.



Obr.16 Prototyp první varianty regulátoru tlaku

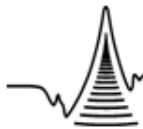
Na základě výsledků první varianty a ze získaných dalších poznatků byl pro druhou variantu regulátoru tlaku zvolen materiál ze slitiny hliníku, konkrétně se jednalo o typ slitina EN AW-6082, která vyniká svými mechanickými vlastnostmi, dobrou obrobiteľností a vhodností pro vytvoření povrchové úpravy eloxováním. Volbou této slitiny také výrazně klesla celková váha a cena materiálu. Prototyp kolmého regulátoru tlaku včetně uchyceného manometru je vidět na obr. 17.



Obr.17 Prototyp druhé varianty regulátoru tlaku

3.2 Možnosti sériové výroby a s tím související nutné úpravy

Jak již bylo popsáno v předchozím textu, může být značný rozdíl mezi způsobem výroby prototypu a sériovou výrobou. Rozdíl je tím větším, čím větší série je vyráběna. Pokud by se po následné výrobě prototypu uvažovalo o výrobě dalších 5-20 ks, tak by s velkou pravděpodobností postup zůstal podobný a výroba by byla prováděna na obdobných strojích jako výroba prototypu. V případě větší série se již uplatní CNC obráběcí stroje, neboť časovou náročnost na programování a přípravu stroje již vyváží rychlost



a přesnost výroby a celková cena tak bude nižší než při kusové výrobě na konvenčních strojích. Při výrobě opravdu velkých sérií 10 tisíc kusů a více, se v dnešní době stále ještě používají mechanické obráběcí automaty.

U malosériové výroby by se dal použít u obou navržených variant CNC soustruh a CNC frézka vybavená 4 osou, která by umožnila rovnoměrné vyvrtání přepouštěcích kanálků po obvodu pístu, otvorů a drážek v tělech regulátorů. Při tomto způsobu výroby by nebylo nutné provádět žádné změny v návrhu.

V případě větší série by bylo vhodné využít přesného odlévání hliníkových slitin do forem, popřípadě tlakového vstřikování plastů. Před zvolením této varianty je nutné propočítat vstupní náklady, které se na jednu formu pro vstřikování plastů pohybují v řádu 6.000-100.000 Kč, v závislosti na složitosti formy. Před tímto propočtem nelze přímo říci, pro jak velkou sérii se již vyplatí použít tuto technologii výroby. Zároveň je nutné očekávat, že se některé díly budou muset přizpůsobit, aby je bylo možno takto vyrobit, popřípadě provést další výpočty, jelikož plastické hmoty mají výrazně nižší meze pro maximální tlakové zatížení.

4 Měření na vyrobených regulátorech

V této kapitole lze nalézt naměřené výsledky na obou variantách regulátoru tlaku a zároveň jejich konfrontaci s teoretickými výpočty. Při výpočtech byly využity zjednodušené vzorce, které nezohledňovaly některé fyzikální vlastnosti vzduchu (tření, termodynamické děje, atd.).

Dále jsou zde zobrazeny výsledky měření na zakoupeném průmyslovém regulátoru tlaku a vyhodnocení výsledků jednotlivých měření.

4.1 Způsob měření jednotlivých parametrů regulátoru

Před samotným měřením je nutné stanovit, co bude nutné měřit a jakým způsobem bude měření provedeno. V kapitole 1.2 byly uvedeny jednotlivé parametry regulátoru, které určují jeho použití, a které je na prototypu zapotřebí změřit. Z těchto parametrů je vyloučen parametr vstupního tlaku, který je určen již při samotné konstrukci regulátoru. Pro určení ostatních parametrů je však nutné provést následující měření těchto veličin:

- **Výstupní tlak**
- **Opakovatelná přesnost výstupního tlaku**
- **Objemový průtok**
- **Tlaková difference při daném průtoku**

4.1.1 Měření výstupního tlaku

Rozsah výstupního tlaku lze měřit velmi jednoduše, protože pro měření postačuje buď zabudovaný manometr na těle regulátoru nebo připojený manometr na výstupu regulátoru. Nejprve se na vstup regulátoru přivede vstupní tlak, který by měl být nejméně o 20 % větší než je maximální předpokládaný výstupní tlak z regulátoru. Dále se člen pro nastavení tlaku nastaví do polohy pro minimální výstupní tlak a provede se odečet hodnoty na manometru. Některé regulátory se chovají, při nastavení na minimální výstupní tlak, jako uzavírací ventily a jejich minimální výstupní tlak je roven

nule. Po zjištění minimálního výstupního tlaku se postupně nastavuje vyšší výstupní tlak a provádí se odečet na manometru. V momentě, kdy tlak na výstupním manometru stoupne na vstupní tlak, se nastavení vrátí na předchozí hodnotu, při které ještě nebyl výstupní tlak roven vstupnímu a provede se navýšení vstupního tlaku pouze o polovinu předchozího zvýšení tlaku. Tento postup se opakuje, dokud není nalezen výstupní tlak, který neodpovídá vstupnímu tlaku, a který je zároveň větší než předchozí nastavení regulátoru.

4.1.2 Měření opakovatelné přesnosti výstupního tlaku

Při tomto měření se nejprve regulátor nastaví na střední hodnotu rozsahu výstupního tlaku při maximálním vstupním tlaku do regulátoru. Následně se provede série odpouštění regulovaného vzduchu z regulátoru s různými objemy a rychlostmi průtoku. Poté se provede nový odečet hodnoty tlaku na výstupu regulátoru při maximálním vstupním tlaku a hodnota se zaznamená. Tato procedura se provede několikrát po sobě, aby se omezila případná chyba měření a jednotlivé výsledky se zprůměrují. Tímto způsobem lze zjistit opakovatelnou přesnost pro konstantní vstupní tlak. Následně je nutné provést měření výstupního tlaku v závislosti na změně vstupního tlaku.

Měření opakovatelné přesnosti výstupního tlaku má první fázi společnou s předchozím měřením. Nastaví se maximální vstupní tlak a výstupní tlak se zvolí jako střední hodnota rozsahu výstupního tlaku. Následně se provede dílčí snížení vstupního tlaku tím, že se přes regulátor odpustí část vzduchu ze zásobníku vstupního tlaku a provede se další odečet výstupního tlaku, tentokrát již pro částečně snížený vstupní tlak. Tento postup se několikrát opakuje, dokud vstupní tlak v zásobníku neklesne na hodnotu výstupního tlaku a jako v předchozím případě se celý tento proces vykoná několikrát po sobě pro omezení chyby měření.

Celková opakovatelná přesnost výstupního tlaku je omezena změnou tlaku, která vznikne při opakovaném měření pro stejný vstupní tlak a změnou tlaku, jež vznikne na výstupním tlaku při změně vstupního tlaku.

4.1.3 Měření objemového průtoku

Pro měření objemového průtoku je nejlepší využít měřicí přístroje k tomuto účelu zkonstruované. Před samotným měřením je nutné vzít v úvahu to, že pokud potřebujeme změřit množství vzduchu, je podstatné nejen jaký objem byl naměřen, ale také pod jakým tlakem a při jaké teplotě měření proběhlo. Bez těchto údajů nelze vzájemně porovnávat dvě rozdílná měření. V případě, že jsou tyto údaje zaznamenány, je možné každý naměřený výsledek převést na tzv. normovaný stav a tyto výsledky v normovaném stavu lze již mezi sebou porovnat. Normovaný stav vychází z přepočtové rovnice (4). [7]

$$P_1 \frac{V_1}{t_1} = P_2 \frac{V_2}{t_2} \quad (4)$$

Při samotném měření se přístroje napojí na výstup z regulátoru a dle pokynů výrobce pro konkrétní měřidlo se provede vlastní měření.

Při měření objemového průtoku či porovnávání dvou regulátorů, lze využít i jednodušší metody, ke které není nutné vlastnit samotný měřicí přístroj. Při tomto měření se využije tlaková nádoba o známém objemu, na které je umístěn manometr pro odečet vnitřního tlaku v nádobě. Měřený regulátor se připojí na výstup z nádoby a ta se natlakuje na dvojnásobek výstupního tlaku z regulátoru. Následně se otevře výstup z regulátoru a současně s otevřením výstupu se zmáčknou měřicí stopky času. Ukončení měření času se provede v okamžiku, kdy tlak v nádobě poklesne na předem stanovený tlak. Tento stanovený tlak je vhodné zvolit tak, aby byl o 1-2 bary vyšší než je výstupní tlak z regulátoru. Ze známého objemu nádoby a poklesu tlaku za daný čas lze dle vzorce 2 vypočítat celkový objemový průtok regulátorem.

U tohoto měření je podstatně důležitější provést úkony několikrát za sebou a zprůměrovat výsledky, jelikož měření je výrazně zatíženo měřicí chybou obsluhy oproti předchozím měřením.

4.1.4 Měření tlakové difference při daném průtoku

Poslední měření, které je nutné provést, má určit jak výrazně se mění výstupní tlak při různých velikostech objemového průtoku.

Při tomto měření se sleduje především míra poklesu výstupního tlaku z regulátoru a zároveň se využívá předchozího měření objemového průtoku, případně je možné toto měření provést současně s měřením objemového průtoku.

Lze říci, že samotné měření probíhá obdobně jako u měření objemového průtoku, pouze se navíc sleduje míra poklesu výstupního tlaku z regulátoru pro různé velikosti objemového průtoku a následné výsledky se zanesou do grafu, který zobrazuje závislost výstupního tlaku z regulátoru na objemovém průtoku regulátorem.

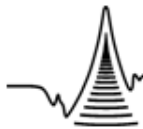
4.2 Použité nástroje při měření

Pro samotné měření tlaků byly použity manometry značky Wikka s rozsahem stupnice 0-10 bar a třídou přesnosti 1,6.

Tlakový vzduch zajišťoval jednopístový kompresor značky Woodstar nesoucí typové označení CB 24 (obr. 18). [8]



Obr. 18 Jednopístový kompresor CB 24



Kompresor CB 24 má následující technické parametry:

- Motor: 230 V/50 Hz
- Příkon: 1 500 W/2,0 PS
- Počet otáček: 2 850 ot./min.
- Pracovní tlak max.: 8,9 bar
- Objem vzdušníku: 24 l
- Sací výkon: 220 l/min.
- Regulace pracovního tlaku: ANO
- Množství oleje: 0,3 l
- Rozměry stroje d/š/v: 575/270/605 mm
- Hmotnost cca: 25,5 kg

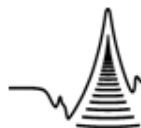
Pro samotné měření byly nejdůležitější údaje o maximální pracovním tlaku 8,9 bar a objemu vzdušníku 24 l. [8]

Pro měření času byly použity digitální stopky, které měří čas na 2 desetinná místa.

4.3 Předpokládané výsledky měření na základě výpočtů

Před samotným měření byly provedeny výpočty jednotlivých parametrů regulátorů. Ty by měly částečně korespondovat s naměřenými výsledky. Výpočty byly prováděny pro zjednodušené modely, které nezohledňovaly tření jednotlivých součástí a dynamické a termodynamické vlastnosti vzduchu.

Pro výpočet velikosti maximálního výstupního tlaku se vycházelo ze základního předpokladu, že tlaková síla působící na plochu pístu s kanálky může být maximálně rovna velikosti síly tlačené pružiny. V případě překročení tohoto rovnovážného stavu dojde k tomu, že regulace přestane fungovat, což se projeví tím, že prostor s neregulovaným tlakem a prostor s regulovaným tlakem bude trvale spojen a výstupní tlak bude odpovídat vstupnímu tlaku. Ke zjištění maximální velikosti výstupního regulovaného tlaku je nutné znát maximální velikost síly, kterou vyvine tlačná pružina a velikost plochy pístu, na kterou tlakový vzduch působí. Následně se údaje zanesou



do jednoduchého vzorce (5), jehož výsledkem je maximální výstupní regulovaný tlak, který je možné na daném regulátoru nastavit.

$$P_{max} = \frac{FP_{max}}{S_p} \quad (5)$$

Pro obě varianty byla použita stejná tlačná vinutá pružina firmy Hennlich s označením 62/2/3, kterou je možné maximálně stlačit o 25,7 mm a při tomto stlačení vytvoří sílu 248 N. Vnější průměr pružiny je 14,5 mm a vnitřní průměr 10,5 mm. Délka v nezatíženém stavu je 49,5 mm a tvoří ji 8,5 aktivních závitů. [9]

Při výpočtu maximálního výstupního tlaku pro první variantu je třeba nejprve spočítat plochu pístu s přepouštěcími kanálky, na kterou působí regulovaný tlak proti atmosférickému tlaku nacházejícímu se v prostoru s vinutou pružinou. Pro výpočet výsledné plochy se využije vzorec (6) určený pro výpočet plochy mezikruží, přičemž velký průměr D je 19 mm, malý průměr d je 9,6 mm a výsledná plocha S je tedy 211 mm².

$$S_p = \frac{D^2 - d^2}{4} \pi \quad (6)$$

Po dosazení plochy S a síly pružiny $F = 248$ N do vztahu (5) je výsledný maximální výstupní tlak pro první variantu regulátoru roven 1,17 MPa tj. zaokrouhleně 12 bar.

Výpočet druhé varianty je obdobný, pouze se vztah (6) upraví do podoby vztahu (7) a za průměr D se dosadí hodnota 20 mm. Výsledná plocha je tedy 314 mm².

$$S_p = \frac{\pi D^2}{4} \quad (7)$$

Po opětovném dosazení do vztahu (5) je maximální výstupní tlak pro druhou variantu roven 0,79 MPa, tedy přibližně 8 bar.

V případě výpočtu opakovatelné přesnosti by měl být výstupní tlak nezávislý na vstupním tlaku a odchylka by měla být nulová, jelikož vstupní tlak netlačí na žádnou plochu, přes kterou by silově působil na osovou polohu pístu.

Pokles tlaku na základně deformace těsnící manžety nelze spočítat bez předchozího experimentálního měření velikosti deformace těsnící manžety.

Objemový průtok lze teoreticky obtížně spočítat, protože je pro výpočet nutné znát rychlosti proudění vzduchu a tlakové ztráty v jednotlivých částech regulátoru.

Výpočet tlakové difference při daném průtoku lze naopak spočítat poměrně dobře, respektive lze určit teoretický pokles tlaku v závislosti na velikosti průtoku určeného v procentech a vztaženého k maximálnímu průtoku. K tomuto výpočtu je třeba znát maximální výstupní tlak, velikost stlačení vinuté pružiny, tvar a uspořádání přepouštěcích kanálků.

Postup výpočtu je založen na předpokladu, že pro maximální objemový průtok je nutné posunout píst s kanálky tak, aby všechny kanálky byly celým objemem vysunuty do prostoru s neregulovaným vzduchem, přičemž za počáteční polohu pístu se považuje ta poloha, kdy břit těsnící manžety dosedá těsně před okraj kanálků. Vzdálenost, kterou píst musí překonat z výchozí polohy do polohy pro maximální otevření, je následně přepočítána dle tuhosti pružiny na tlak, o jaký se zmenší výstupní tlak oproti tlaku přednastaveném. Tyto vztahy zobrazuje vzorec pro pokles (8).

$$P_z = l / \frac{S_{max}}{P_{max}} \quad (8)$$

Pro první variantu se do vzorce dosadí vzdálenost d o velikosti 3 mm, která odpovídá průměru kanálku. Za maximální výstupní tlak P_{max} se dosadí 11,7 bar a za maximální změnu délky pružiny S_{max} se dosadí 25,7 mm.

Výsledný teoretický maximální pokles tlaku P_z pro první variantu pak bude 1,37 bar, popřípadě 0,68 bar pro 50% maximální objemového průtoku za předpokladu dokonalé linearit stlačení pružiny.

Pro druhou variantu je výpočet obdobný, pouze se změní vzdálenost d , která pro tuto variantu činí 1,2 mm a maximální výstupní tlak P_{\max} , který je 8 bar. Maximální stlačení pružiny S_{\max} zůstává stejné, jelikož obě varianty mají stejnou vinutou pružinu. Teoretický pokles tlaku P_z pro maximální objemový průtok pak je 0,37 bar.

4.4 Výsledky měření navrhnutých regulátorů

Měření na obou variantách navrhnutých regulátoru probíhalo podle postupů popsanych v předchozí kapitole. Výsledky měření jednotlivých parametrů regulátoru jsou zobrazeny v následujících tabulkách a grafech.

Při měření tlaku byl použit manometr s třídou přesnosti 1,6 a rozsahem stupnice 0-10 bar. Na základě těchto údajů byla podle vzorce (9) spočítána nejistota měřicího přístroje u_b 0,09 bar. [1]

$$u_B = \frac{T_P R}{3} 10^{-2} \quad (9)$$

Jelikož stupnice obsahovala dílky o velikosti 0,5 bar, které byly dostatečně tenké vůči jejich vzájemným vzdálenostem, vznikla při odečtu hodnoty na stupnici chyba odhadu o velikosti 0,1 dílku, tedy $\pm 0,05$ bar. [1]

Měření všech regulátorů probíhalo během krátkého časového úseku, při kterém se neměnily parametry měřidla ani měřeného objektu (teplota, vlhkost, opotřebení)

Protože pro zpracování výsledů měření nebyla zásadní samotná reálná velikost výstupního tlaku, která je zatížena chybou měřicího přístroje, ale především vlastní vzájemná změna tlaku, lze říci, že samotný naměřený tlakový rozdíl je zatížen pouze chybou odečtu.

Z výše popsaného vyplývá, že maximální a minimální velikost výstupního tlaku je zatížena nejistotou měření $\pm 0,14$ bar. Při měření opakovatelné přesnosti a poklesu výstupního tlaku při daném průtoku je měření zatíženo nejistotou měření o velikosti $\pm 0,05$ bar.

Nejprve bylo provedeno měření maximálního a minimálního výstupního tlaku. U první varianty byl maximální výstupní tlak roven 10,9 bar a minimální výstupní tlak 0,7 bar. U druhé varianty byl maximální výstupní tlak 8,2 bar a minimální nastavitelný výstupní tlak 0 bar.

Po tomto měření následovalo měření opakovatelné přesnosti výstupního tlaku.

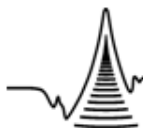
Tabulka 1 - Výstupní tlak - opakovatelná přesnost

Výstupní tlak - opakovatelná přesnost [bar]		
Č. měření	První varianta	Druhá varianta
1	5,1	4,9
2	5,0	5,0
3	5,1	5,0
4	5,0	4,9
5	5,1	5,0

U obou variant byla opakovatelná přesnost v rozmezí 0,1 bar, tedy v přepočtu na procenta byla maximální odchylka 2%.

Tlaková difference vzniklá změnou vstupního tlaku z počáteční hodnoty 8,85 bar na konečný výstupní tlak 4,5 bar měla pro obě varianty lineární průběh, přičemž výstupní tlak u první varianty postupně klesal z původní hodnoty 4,1 bar na hodnotu 4 bary a u druhé varianty výstupní tlak klesal ze 4 bar na hodnotu 3,8 bar.

Výpočet maximálního objemového průtoku byl proveden podle postupu popsaného v kapitole 4.1.3.



Tabulka 2 - Maximální objemový průtok

Maximální objemový průtok – čas v s potřebný pro protečení 62 l vzduchu		
Č. měření	První varianta	Druhá varianta
1	5,33	4,13
2	5,52	4,25
3	5,50	4,22
4	5,42	4,16
5	5,47	4,20
Průměr	5,40	4,20

Tabulka 3 - Maximální objemový průtok

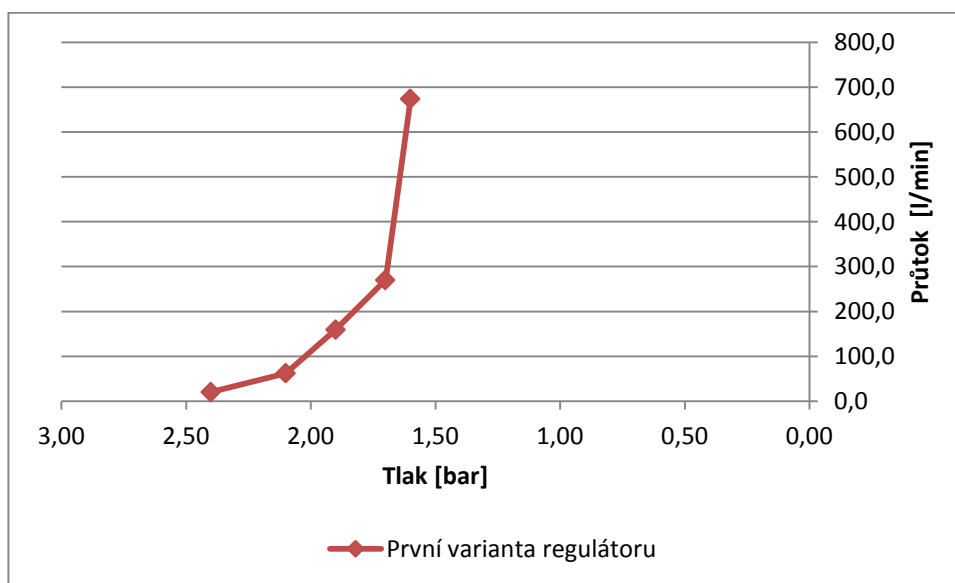
Maximální objemový průtok v l/min		
Č. měření	První varianta	Druhá varianta
1	688,9	889,1
2	665,2	864,0
3	667,6	870,1
4	677,5	882,7
5	671,3	874,3
Průměr	674,0	876,0

Při měření změny výstupního tlaku v závislosti na daném průtoku byl měřen čas potřebný pro protečení 62 l vzduchu. Tento čas byl následně přepočítán na objemový průtok v litrech za minutu. Původní výstupní tlak v klidovém stavu byl pro obě varianty 5 bar.

Tabulka 4 - Pokles výstupního tlaku při daném průtoku

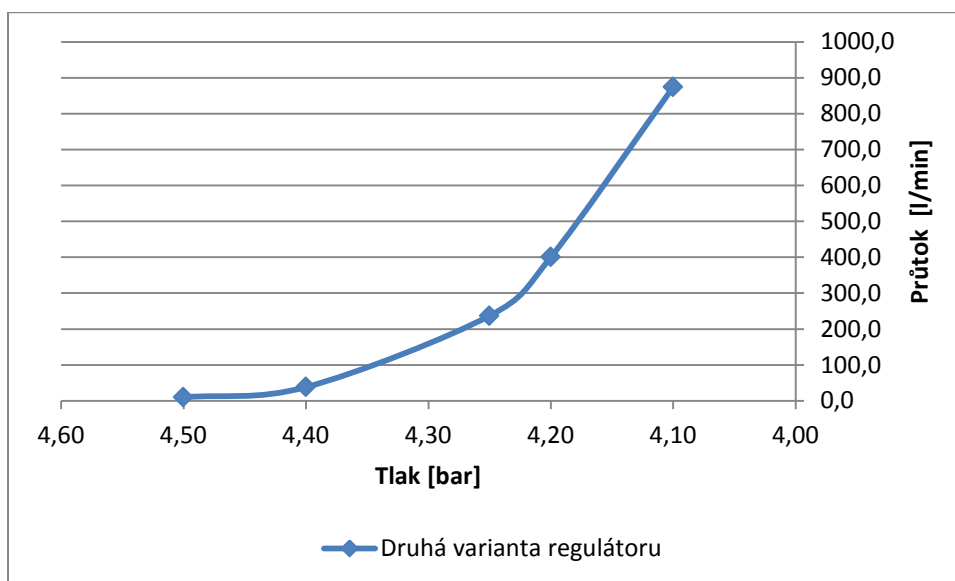
Pokles výstupního tlaku při daném průtoku		
První varianta:		
Tlak [bar]	Čas [s]	Průtok [l/min]
2,4	180,00	20,4
2,1	59,20	62,0
1,9	23,00	159,7
1,7	13,60	270,0
1,6	5,45	673,8
Druhá varianta:		
Tlak [bar]	Čas [s]	Průtok [l/min]
4,5	374,00	9,8
4,4	96,00	38,3
4,3	15,49	237,1
4,2	9,17	400,4
4,1	4,20	874,3

Graf 1 – První varianta regulátoru



Graf 1 zobrazuje závislost objemového průtoku na poklesu výstupního tlaku první varianty regulátoru.

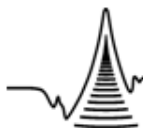
Graf 2 – Druhá varianta regulátoru



Graf 2 zobrazuje závislost objemového průtoku na poklesu výstupního tlaku druhé varianty regulátoru.

4.5 Výsledky měření průmyslového regulátoru

Pro možnosti porovnání navrhnutých regulátorů bylo provedeno měření na běžně prodávaném průmyslovém regulátoru tlaku výrobce Festo nesoucí označení **MS4-LRB-1/4-D5-A8-A5** (obr. 19). Tento regulátor se standardně používá jako koncová jednotka na regulaci tlakového vzduchu u strojů, kompresorů a rozvodných stanic stlačeného vzduchu. Tento regulátor byl použit především z důvodů aktuální dostupnosti. Maximální výstupní tlak činí 5 bar. Vstupní tlak může být až 14 bar.



Obr.19 Regulátor tlaku MS4-LRB-1/4-D5-A8-A5

Na tomto regulátoru bylo provedeno stejné měření jako na obou variantách navrhovaných regulátorů. Jednotlivé výsledky jsou zobrazeny v následujících tabulkách a grafech.

Tabulka 5 - Maximální objemový průtok (průmyslový regulátor)

Maximální objemový průtok - čas potřebný pro protečení 62l vzduchu	
Č. měření	Průmyslový regulátor
1	4,30
2	4,11
3	4,17
4	4,20
5	4,15
Průměr	4,20

Tabulka 6 - Maximální objemový průtok (první varianta regulátoru)

Maximální objemový průtok v l/min	
Č. měření	První varianta regulátoru
1	854,0
2	893,4
3	880,6
4	874,3
5	884,8
Průměr	877,2

Tabulka 7 - Výstupní tlak - opakovatelná přesnost

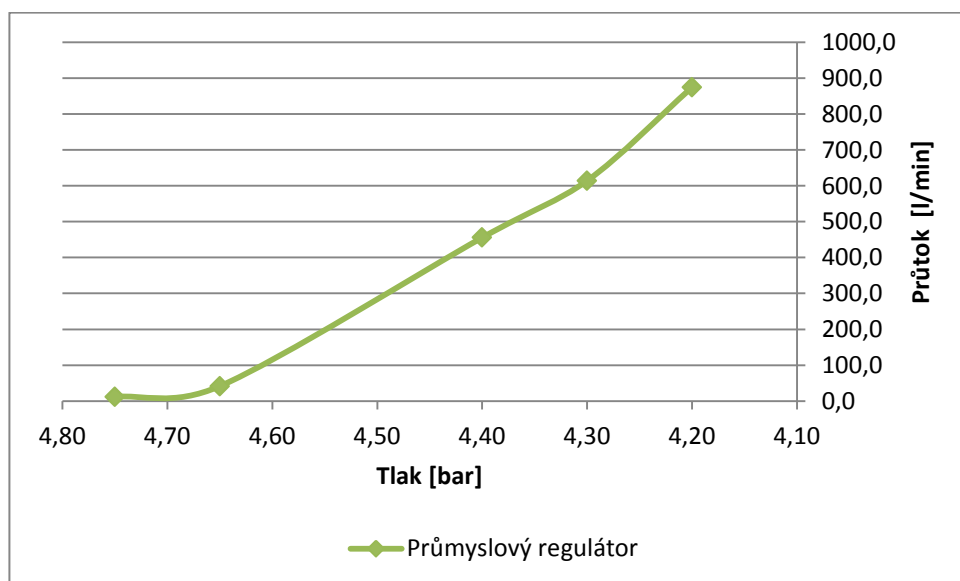
Výstupní tlak - opakovatelná přesnost	
Č. měření	Průmyslový regulátor
1	5,1
2	5,0
3	5,0
4	5,0
5	5,1
Průměr	5,0

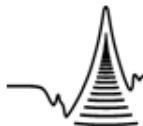
Tlaková diference vzniklá změnou vstupního tlaku z počáteční hodnoty 8,85 bar na konečný výstupní tlak 4,5 bar měla pro průmyslový regulátor lineární průběh, přičemž výstupní tlak u toho regulátoru postupně klesal z hodnoty 4,05 bar na hodnotu 3,9 bar.

Tabulka 8 - Pokles výstupního tlaku při daném průtoku

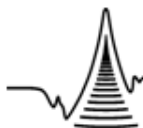
Pokles výstupního tlaku při daném průtoku		
Průmyslový regulátor:		
Tlak [bar]	Čas [s]	Průtok [l/min]
4,7	311,00	11,8
4,6	88,00	41,7
4,4	8,06	455,6
4,3	5,98	614,0
4,2	4,20	874,3

Graf 3 – Průmyslový regulátor





Graf 3 zobrazuje závislost objemového průtoku na poklesu výstupního tlaku průmyslového regulátoru.



5 Vyhodnocení výsledků měření a porovnání navržených regulátorů s průmyslovým regulátorem

5.1 Vyhodnocení výsledků měření

V této podkapitole bude provedeno zhodnocení výsledků jednotlivých měření a jejich porovnání s teoretickými výsledky. Budou zde zhodnoceny pouze výsledky měření navrhovaných regulátorů, pro které byly provedeny teoretické výpočty.

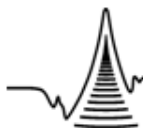
Maximální vypočtený výstupní tlak pro první variantu byl 11,7 bar a předpokládaný minimální výstupní tlak byl 0 bar. Oproti tomu naměřený maximální výstupní tlak byl roven 8,2 bar a minimální výstupní tlak byl roven 0,7 bar.

Důvodem rozdílných výsledků je především to, že teoretický výpočet vycházel pouze z fyzikálních parametrů pružiny, plochy pístu a tlaku a předpokládal maximální předepnutí či naopak roztažení tlačné pružiny. Na vyrobeném regulátoru však bylo mechanické omezení v podobě maximální a minimálního stlačení pružiny, což zajistilo to, že nebylo možné dosáhnout krajních mezí jednotlivých rozsahů stlačení pružiny, a tedy i krajních rozsahů výstupního tlaku.

U druhé varianty byl vypočtený výstupní tlak roven 7,9 bar a předpokládaný minimální výstupní tlak roven 0 bar. Z naměřených výsledků vychází maximální výstupní tlak roven 8,2 bar a minimální výstupní tlak 0 bar.

Rozdíl mezi teoretickými a vypočtenými výsledky je velmi malý a rozdíl 0,3 bar u maximálního naměřeného výstupního tlaku oproti vypočtenému je především z důvodů tolerance síly pružiny udávané výrobcem. U této varianty nebylo vytvořeno mechanické omezení na maximální či minimální stlačení pružiny.

Při zhodnocení měření opakovatelné přesnosti nelze výsledky porovnat s vypočtenými, pouze je lze logicky konfrontovat. Opakovatelná přesnost při konstantním vstupním tlaku u obou variant se pohybovala



s maximálním rozdílem tlaku 2%, což lze zdůvodnit třecími silami a změnami teploty.

Tlaková difference výstupního tlaku o velikosti 0,1 až 0,2 bar vzniklá změnou vstupního tlaku byla pravděpodobně způsobena částečnou deformací těsnící manžety a rozdílnou rychlostí proudění vzduchu při změně vstupního tlaku. Je vidět že při použití kompenzace deformace manžety u první varianty je tato tlaková difference o 50% menší než u druhé varianty.

Výsledky měření objemového průtoku nelze porovnat s teoretickými výsledky, jelikož průtok nelze jednoduše spočítat. Lze pouze konstatovat, že druhá varianta měla průtok vzduchu 876 l/min a první varianta 674 l/min. Druhá varianta tedy měla větší průtok o 33% než první varianta.

Maximální tlaková difference při daném průtoku byla pro první variantu spočítána na hodnotu 1,37 bar. Reálné měření zaznamenalo maximální pokles tlaku o 3,4 bar. Tedy změnu výstupního tlaku z původních 5 bar při nulovém průtoku na výstupní tlak 1,6 bar. Při minimálním objemovém průtoku v řádu jednotek procent maximálního průtoku poklesl výstupní tlak na hodnotu 2,4 bar.

U druhé varianty byl maximální teoretický pokles tlaku vypočítán na hodnotu 0,37 bar. Reálný měřený maximální pokles byl 0,9 bar, tedy klesl z tlaku 5 bar na hodnotu 4,1 bar. Při minimálním objemovém průtoku byl pokles tlaku o 0,5 bar, tedy pokles na hodnotu 4,5 bar.

Z měření je patrný velmi velký rozdíl vypočtených a měřených výsledků, především u první varianty. Hlavním faktorem, který ovlivňoval reálná měření, bylo to, že před pohybem pístu bylo nutné překonat třecí síly a také vzdálenost tloušťky těsnícího bříty a tzv. mrtvý chod pístu. Tyto faktory nebyly při výpočtech uvažovány. V případě porovnávání reálného poklesu tlaku při minimálním a maximálním průtoku, se výsledky především u druhé varianty velmi přibližují k výpočtům, kdy reálný pokles byl v řádu 0,4 bar oproti vypočtenému poklesu 0,37 bar. Tato shoda je dána tím, že výsledky měření pro minimální a maximální průtok již neovlivňují předchozí faktory v podobě tření a mrtvého chodu pístu mezi nulovým průtokem a minimálním průtokem. U obou variant samotný výsledek také zhoršují nepřesnosti při výrobě

jednotlivých kanálků, jelikož koncová poloha pro těsnící břit je vždy brána pro kanálek, který je nejvíce stranově vyosený, což zvětšuje mrtvý chod pístu.

V případě srovnání obou variant dle tlakové difference při daném průtoku je jasně patrný velký rozdíl mezi první a druhou variantou. Pro relativní pokles mezi maximálním a minimálním průtokem má první varianta dvakrát větší pokles výstupního tlaku ve srovnání s druhou variantou, a pro absolutní pokles tlaku má první varianta pokles dokonce 3,5 krát větší.

5.2 Porovnání navržených regulátorů s průmyslovým regulátorem

Při celkovém porovnání navržených regulátorů tlaků s průmyslově vyráběným regulátorem **MS4-LRB** bylo provedeno hodnocení především z hlediska parametrů regulace a následně dle výrobních a provozních vlastností.

5.2.1 Porovnání dle parametrů regulace

Před samotným porovnáním dle parametrů regulace je nutné zdůraznit, že srovnávaný průmyslový regulátor měl maximální výstupní tlak 5 bar, a tedy i jeho vinutá pružina měla menší tuhost, tudíž vyšší citlivost na pokles výstupního tlaku, než jakou by měl regulátor s maximálním výstupním tlakem 8-10 bar.

Při porovnání opakovatelné přesnosti výstupního tlaku je patrné dle tabulky 9, že tento parametr byl pro všechny tři regulátory prakticky stejný.

Tabulka 9 - Výstupní tlak - opakovatelná přesnost

Výstupní tlak - opakovatelná přesnost			
Č. měření	První varianta	Druhá varianta	Průmyslový reg.
1	5,1	4,9	5,1
2	5,0	5,0	5,0
3	5,1	5,0	5,0
4	5,0	4,9	5,0
5	5,1	5,0	5,1

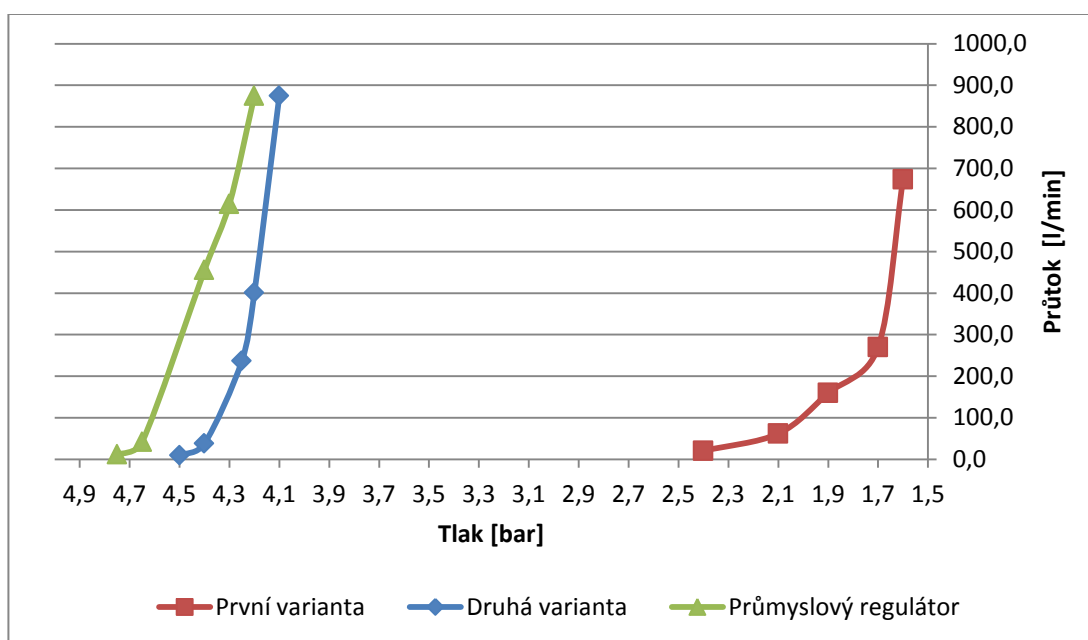
U přesnosti výstupního tlaku změnou vstupního tlaku byly již drobné rozdíly mezi jednotlivými variantami, které však nebyly nikterak zásadní a mohly být ovlivněny chybou odečtu výstupního tlaku. Teoreticky lze prohlásit, že nejlepšího výsledku dosáhla první varianta a nejhorší varianta druhá.

Tabulka 10 - Tlaková difference při změně vstupního tlaku

Tlaková difference při změně vstupního tlaku [bar]		
První varianta	Druhá varianta	Průmyslový regulátor
4,1 – 4,0	4,0 - 3,8	4,1 - 3,9

Maximální objemový průtok a pokles výstupního tlaku všech tří regulátorů jsou zobrazeny v grafu 4.

Graf 4 – Srovnání regulátorů



Z výsledků je patrné, že největší pokles tlaku v závislosti na průtoku a nejmenší maximální objemový průtok má první varianta regulátorů. Při zbylém porovnání druhé varianty a průmyslového regulátoru je maximální průtok naprosto stejný a maximální pokles tlaku je velmi podobný. Průmyslový

regulátor má při nižších průtocích menší pokles tlaku než druhá varianta návrhu, ale při srovnání poklesu tlaku mezi minimálním a maximálním průtokem má naopak druhá varianta menší tlakový rozdíl. Toto porovnání je dobře patrné z průběhu křivek grafu, kde je vidět výrazně lineárnější průběh u průmyslového regulátoru tlaku, a naopak progresivnější křivka u druhé a třetí varianty regulátorů, což je dáno především jinou technologií regulace mezi navrženými regulátory a průmyslovým regulátorem.

Z pohledu celkového srovnání parametrů regulace lze říci, že všechny tři porovnávané regulátory mají velmi podobné parametry a prakticky se výrazně liší pouze první varianta u parametru poklesu výstupního tlaku při daném objemového průtoku.

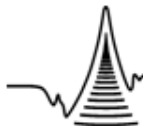
5.2.2 Porovnání dle výrobních a provozních vlastností

Způsob výroby prvních dvou variant byl podstatně jiný než způsob výroby průmyslového regulátor, což je dáno tím, že obě varianty byly prototypy, kdežto průmyslový regulátor byl vyráběn jako sériový výrobek. Z těchto důvodů nelze provést samotné srovnání a je nutné se pokusit srovnat výrobu navržených regulátorů tak, jak by se vyráběly při sériové výrobě.

Při tomto srovnání lze očekávat velmi podobné parametry, co se týče výrobní a materiálové náročnosti všech tří typů regulátorů, jelikož se předpokládá využití výroby dílů pomocí vstřikování plastů a odlévání dílů do forem. Lze jen těžko odhadnout bez hlubší studie, který regulátor by měl nejnižší, a který naopak nejvyšší cenu výroby.

Provozní parametry porovnávaných regulátorů lze zhodnotit následovně. První navrhovaná varianta se nehodí pro aplikace, v kterých je kladen důraz na nízkou změnu výstupního tlaku při nenulovém objemovém průtoku. Zároveň tvar a provedení vstupních a výstupních otvorů tento regulátor předurčuje pro zabudování do rozvodné sítě či strojů mezi potrubí, kde může plnit funkci omezovače maximálního vstupního tlaku.

Druhá varianta je velmi podobná jak tvarem, tak i regulačními parametry průmyslovému regulátoru, a tak ji lze prakticky použít úplně stejně jako



porovnávaný průmyslový regulátor. Zejména tedy jako koncové prvky pro regulaci výstupního tlaku v tlakových systémech, rozvodných sítích a kompresorových stanicích.

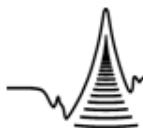
Závěr

V diplomové práci jsem navrhl a realizoval dvě varianty nízkotlakých regulátorů výstupního tlaku vzduchu pro průmyslové účely. Tyto regulátory mají sloužit zejména jako jednotka pro regulaci tlaku vzduchu v rozvodných sítích, a jako vstupní člen u pneumatických zařízení či strojů, u kterých je požadovaná vysoká opakovatelná přesnost vstupního tlaku s možností jeho rychlého přestavení na jinou hodnotu.

V první části práce jsem zpracoval problematiku regulátorů tlaku vzduchu a určil základní parametry regulace důležité pro tyto regulátory.

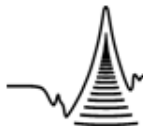
Při samotném návrhu jsem nejprve vytvořil modifikovanou verzi mého navrženého vysokotlakého regulátoru vzduchu a následně vytvořil druhou variantu, která již byla vytvořena jako zcela nový koncept. První varianta byla v podobě podélného a druhá varianta v podobě kolmého regulátoru tlaku. Volba konstrukce navržená v 3D CAD programu byla podmíněna parametry regulace a zároveň výrobními a provozními vlastnostmi. Poté byly stanoveny postupy pro výrobu prototypu a naznačen směr v případě sériové výroby.

Oba návrhy jsem fyzicky realizoval ve své dílně s využitím stolního soustruhu a stolní frézky. Následně jsem na prototypech provedl sérii měření pro určení reálných parametrů, kterými byly zejména maximální a minimální výstupní tlak z regulátoru, opakovatelná přesnost výstupního tlaku, maximální objemový průtok a tlaková diference výstupního tlaku při daném objemovém průtoku. Tyto výsledky byly následně konfrontovány s výsledky měření na zakoupeném průmyslovém regulátoru značky Festo. Porovnání, zejména u druhé varianty, ukázalo velmi podobné vlastnosti, kterých dosahuje průmyslový regulátor. Přičemž použití lepší technologie při výrobě přepouštěcích kanálků u prototypu by dle parametrů regulace pravděpodobně předčilo zakoupený průmyslový regulátor.



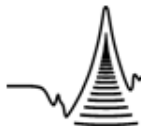
Použitá literatura

- [1] Jenčík J., Volf J., et. Al. *Technická měření*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02138-6.
- [2] Schmid D. a kol. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. 1. vyd. Praha: Europa Sobotáles, 2005. ISBN 80-86706-10-9.
- [3] Svoboda P., Brandejs J., Dvořáček J., Prokeš F. *Základy konstruování*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-584-6.
- [4] Plachý O. *Konstrukce regulátoru výstupního tlaku zásobníku vzduchu*. 1. Liberec, 2009. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [5] David M. *Digitálně řízený proporcionální regulátor tlaku*. [online]. [cit.15.03.2009].
Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/digitalne-rizeny-proporcionalni-regulator-tlaku>>
- [6] Vysokotlaký regulátor firmy Swagelok. [online]. [cit.20.06.2011].
Dostupné z: <<http://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/EN/MS-02-230.PDF>>
- [7] Vlastnosti stlačeného vzduchu [online]. [cit.16.08.2011].
Dostupné z: <http://2009.oc.smc-cee.com/sk/pdf/LG2_Masseinheit.pdf>
- [8] Online obchod Garland [online]. [cit.16.07.2011].
Dostupné z: <<http://www.garland.cz/woodster/kompresory/cb24.php>>
- [9] *Těsnící manžeta 605 a tlačné pružiny*. [online]. [cit.20.08.2011].
Dostupné z: <<http://www.hennlich.cz/>>
- [10] Růžička M. *Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí* [online]. Učební text ČVUT v Praze [cit.6.3.2009].
Dostupné z: <http://mechanika.fsid.cvut.cz/sources_old/pzk/5_1.html>

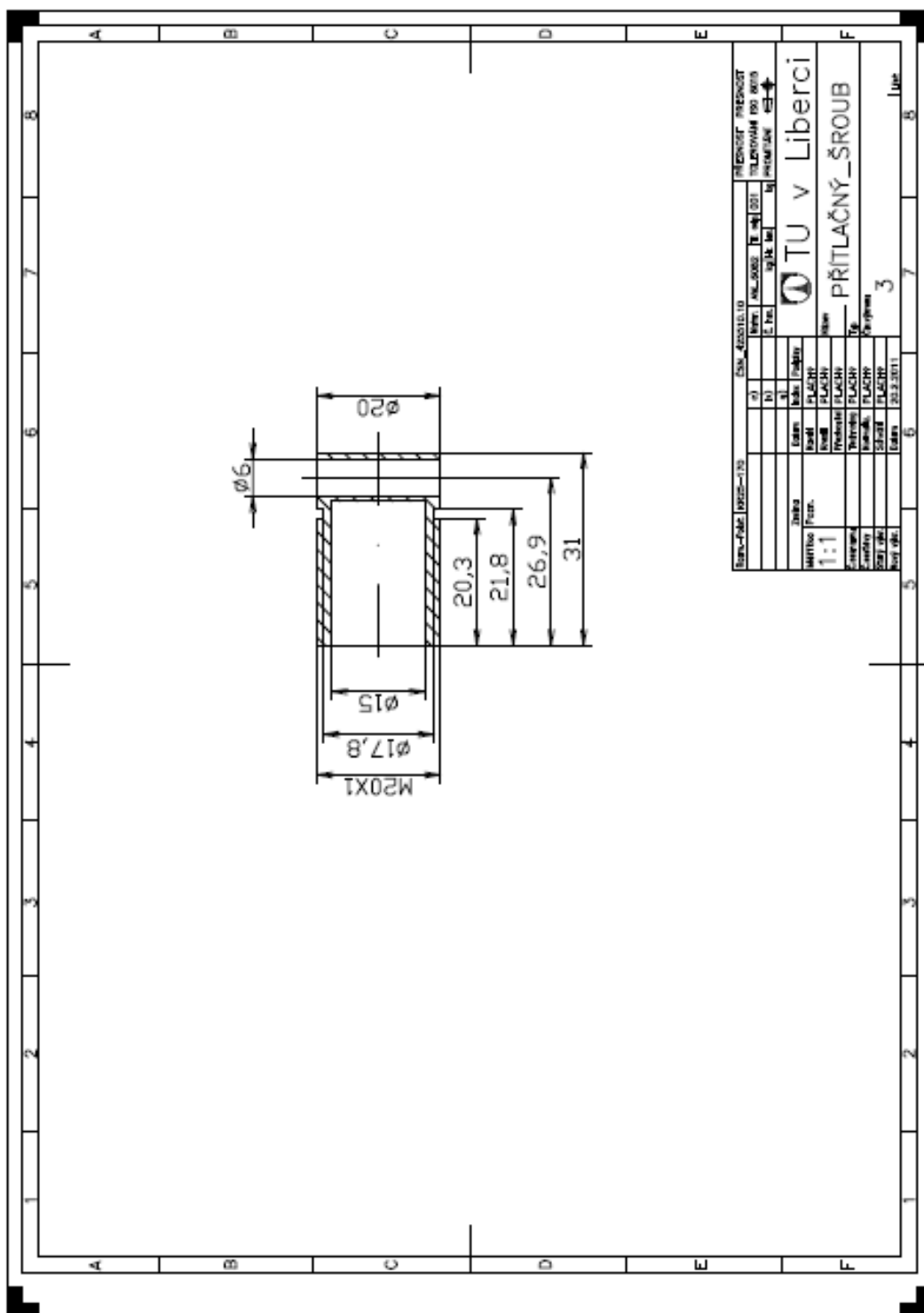


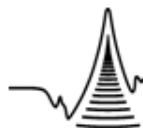
Přílohy diplomové práce

73



Příloha C. Výkresová dokumentace - PŘÍTLAČNÝ ŠROUB





Příloha D. Výkresová dokumentace - PÍST

